



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Fahrgastbefragungen zur thermischen Behaglichkeit im öffentlichen Verkehr

Welche Temperatur empfinden Fahrgäste als «zu warm», «angenehm» oder «zu kalt»?

Schlussbericht



Ernst Sandmeier, Hochschule Luzern - Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE
Technikumstrasse 21, 6048 Horw, ernst.sandmeier@hslu.ch, www.hslu.ch

Johannes Estermann, Schweizerische Bundesbahnen – Personenverkehr
Wylstrasse 125, 3000 Bern 65, johannes.estermann@sbb.ch, www.sbb.ch

Matthias Tuchschnid, Schweizerische Bundesbahnen – Energie
Industriestrasse 1, 3052 Zollikofen, matthias.tuchschnid@sbb.ch, www.sbb.ch

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

CH-3003 Bern

Programmverantwortung

Stephan Husen, Bundesamt für Verkehr

Projektnummer: P-273

Bezugsquelle: Kostenlos zu beziehen über das Internet:

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Luzern / Bern, den 21.09.2023



Fahrgastbefragungen zur thermischen Behaglichkeit im öffentlichen Verkehr



Ein gemeinsames
Branchenprojekt
von sieben Trans-
portunternehmen
des öffentlichen
Verkehrs



© Alle Bilder: Webseiten der Transportunternehmen

Hauptautoren:

Ernst Sandmeier, HSLU; Johannes Estermann, Matthias Tuchs Schmid, SBB

Weitere Mitarbeitende:

SBB: Vanessa Amberg, Yves Aerni, Yannick Zwirner; Thurbo: Markus Rufer;
vzb: Geoffrey Klein.

HSLU: Jürg Schwarz, Franz Sidler, Urs-Peter Menti, Oliver Kehrli, Kai Marti,
Damian Galli.

Begleitgruppe:

SOB: Conradin Knabenhans, Julia Grob; BVB: Yannick Schwob,
Denise Renckly; Thurbo: Christian Baumgartner; tl: Bertrand Alboussiere,
RBS: Christine Schulz; zb: Andreas Liem.

Executive Summary

Als Beitrag zur Vermeidung einer Energiemangellage hat der Vorstand des Verbandes öffentlicher Verkehr (VöV) am 9. September 2022 verschiedene kurzfristige Sofortmassnahmen beschlossen, unter anderem eine zeitlich begrenzte Absenkung der Temperatur in den Fahrgasträumen von November 2022 bis Ende Februar 2023. Die Transportunternehmen (TU) haben diese Reduktionen entweder mittels geänderter Fahrzeugsoftware oder einer manuellen Einstellung durch die Kundenbegleiter umgesetzt. Diese Studie untersucht, wie die Fahrgäste die Temperaturabsenkung im öffentlichen Verkehr wahrgenommen haben. Weitere Einflussfaktoren wie Luftbewegung, Aussenlufttemperatur, Witterung oder Position im Wagen sind nicht Gegenstand dieser Studie.

- Mit Unterstützung des BAV-Programms «Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr» wurde in einer Fahrgastbefragung im Zeitraum vom 26. Januar bis 10. März 2023 das Temperaturempfinden der Fahrgäste bei sieben Transportunternehmen (Fern- und Regionalverkehr sowie Ortsverkehr) ermittelt.
- An 107 Befragungstagen wurden rund 29'400 Fahrgäste befragt, dabei wurden rund 13'200 Antworten in Fernverkehrsfahrzeugen, 14'800 Antworten in Regionalverkehrsfahrzeugen und gut 1'400 Antworten im Ortsverkehr erfasst.
- Insgesamt ist die Zufriedenheit hoch (85 % und mehr) und unterscheidet sich im Fernverkehr bei Temperaturen zwischen 20 °C und 22 °C kaum. Im Regionalverkehr erreicht die Zufriedenheit bei Temperaturen zwischen 18 °C und 20 °C beste Werte (86 % und mehr). Bei einer Aufenthaltsdauer der Fahrgäste unter 10 Minuten ist die Zufriedenheit auch bei 16 °C bis 17 °C weiterhin hoch (87 % und mehr).
- Auffällig ist, dass der Anteil Fahrgäste mit Rückmeldungen «zu warm» im Regionalverkehr deutlich über dem Anteil Rückmeldungen «zu kalt» liegt.
- Weiter wurde beobachtet, dass mit Anpassung der Fahrzeugsoftware eine zuverlässige Absenkung der Fahrgastraumtemperatur erreicht werden konnte, die manuelle Absenkung führte zu weniger wirksamen Ergebnissen.

Aufgrund dieser Ergebnisse sollen möglichst viele Unternehmen des öffentlichen Verkehrs prüfen, inwieweit unter Berücksichtigung von Reisedauer und Fahrzeugeigenschaften die Temperatur in den Fahrgasträumen zur Energieeinsparungen dauerhaft gesenkt werden kann.

Gemäss ersten Hochrechnungen auf Basis der Anzahl Fahrzeuge könnte eine reduzierte Fahrgastraumtemperatur bei den Unternehmen des öffentlichen Verkehrs der Schweiz bis zu 38 GWh elektrische Energie pro Jahr einsparen. Aufgrund von Kosten für die Änderungen ist die Umsetzung wahrscheinlich nur auf einem Teil der Flotte in den nächsten 10 Jahren möglich. Daher wird angenommen, dass mit Neubeschaffungen von Fahrzeugen oder Aktualisierungen der Fahrzeugsoftware rund 60 % des Potenzials, resp. 20 bis 25 GWh/Jahr realisiert werden können. Dies entspricht rund 1 % bis 2 % der gesamten Energie, welche für den schienengebundenen öffentlichen Verkehr und Trolleybusse eingesetzt werden.

Die VöV-Arbeitsgruppe «Nachhaltige Energie» wird das weitere Vorgehen innerhalb der Branche koordinieren und auf Basis der Ergebnisse möglichst branchenweite Empfehlungen für Sollwerttemperaturen je Verkehrsfunktion erarbeiten.

Résumé exécutif

- Afin de contribuer à la prévention d'une pénurie d'énergie, le Comité de l'Union des transports publics (UTP) a décidé le 9 septembre 2022 de prendre différentes mesures immédiates à court terme, notamment un abaissement de la température dans les compartiments voyageurs de novembre 2022 à fin février 2023. Les entreprises de transport (ET) ont mis en œuvre ces abaissements soit en modifiant le logiciel des véhicules, soit en demandant aux assistantes et assistants clientèle de procéder à un réglage manuel. La présente étude examine la manière dont les voyageuses et voyageurs perçoivent cet abaissement de la température dans les transports publics. D'autres facteurs d'influence tels que le mouvement de l'air, la température de l'air extérieur, les conditions météorologiques ou la position dans le wagon ne font pas l'objet de cette étude. Avec le soutien du programme de l'OFT « Stratégie énergétique 2050 des transports publics », une enquête a été menée auprès des voyageuses et voyageurs entre le 26 janvier et le 10 mars 2023 afin de déterminer leur perception de la température dans les véhicules de sept entreprises de transport (trafics grandes lignes, régional et local).
- Au cours de 107 journées d'enquête, environ 29 400 voyageuses et voyageurs ont été interrogés. On dénombre environ 13 200 réponses dans les véhicules du trafic grandes lignes, 14 800 dans ceux du trafic régional et un peu plus de 1400 dans ceux du trafic local.
- Dans l'ensemble, le niveau de satisfaction est élevé (85% et plus) et ne varie guère en trafic grandes lignes pour des températures comprises entre 20° C et 22° C. C'est en trafic régional que le taux de satisfaction est le plus élevé (86% et plus) avec des températures comprises entre 18° C et 20° C. Quand les voyageuses et voyageurs passent moins de 10 minutes dans le train, le niveau de satisfaction reste élevé (87% et plus) même lorsque la température est comprise entre 16° C et 17° C.
- Il est frappant de constater que la part des passagers ayant signalé avoir « trop chaud » est nettement supérieure à celle des passagers ayant signalé avoir « trop froid » dans le trafic régional.
- De plus, on observe que l'adaptation du logiciel des véhicules permet d'obtenir un abaissement fiable de la température du compartiment voyageurs, alors que l'abaissement manuel donne des résultats moins efficaces.

Sur la base de ces résultats, le plus grand nombre possible d'entreprises de transports publics doit examiner dans quelle mesure il est possible d'abaisser durablement la température dans les compartiments voyageurs afin de réaliser des économies d'énergie en tenant compte de la durée du voyage et des caractéristiques des véhicules.

Selon les premières extrapolations fondées sur le nombre de véhicules, un abaissement de la température des compartiments voyageurs pourrait permettre aux entreprises de transports publics suisses d'économiser jusqu'à 38 GWh d'électricité par an. Vu le coût des modifications, cette mesure ne pourra vraisemblablement être mise en œuvre que sur une partie de la flotte au cours des dix prochaines années. On estime donc que l'acquisition de nouveaux véhicules ou la mise à jour des logiciels des véhicules permettra de réaliser environ 60% de l'économie potentielle, soit 20 à 25 GWh/an. Cela correspond à environ 1% à 2% de l'énergie totale utilisée pour les transports publics sur rail et les trolleybus.

Le groupe de travail «Énergie durable» de l'UTP coordonnera la suite de la procédure au sein de la branche et élaborera, sur la base des résultats obtenus, des recommandations pour les températures de consigne par fonction de transport, si possible applicables à l'échelle de la branche.

Executive Summary

As a contribution to avoiding an energy shortage, the Board of the Association of Public Transport (VöV) decided on 9 September 2022 on various short-term emergency measures, including a temporary reduction of the temperature in the passenger compartments from November 2022 to the end of February 2023. The transport companies implemented these reductions either by means of modified vehicle software or a manual adjustment by the customer attendants. This study investigates how passengers perceived the temperature reduction in public transport. Other influencing factors such as air movement, outside air temperature, weather or position in the passenger compartments are not the subject of this study.

- With the support of the FOT program "Energy Strategy for Public Transport (ESPT) 2050", a passenger survey was conducted between 26 January and 10 March 2023 to determine the temperature sensitivity of passengers in seven transport companies (long-distance, regional and local transport).
- On 107 survey days, around 29,400 passengers were interviewed, with around 13,200 responses in long-distance vehicles, 14,800 responses in regional vehicles and a good 1,400 responses in local transport.
- Overall, satisfaction is high (85 % and more) and hardly differs in long-distance traffic at temperatures between 20 °C and 22 °C. In regional transport, satisfaction reaches best values (86 % and more) at temperatures between 18 °C and 20 °C. When passengers stay less than 10 minutes, satisfaction remains high (87% and above) even at 16 °C to 17 °C.
- It is noticeable that the proportion of passengers with feedback "too warm" in regional transport is significantly higher than the proportion of feedback "too cold".
- Furthermore, it was observed that a reliable lowering of the passenger compartment temperature could be achieved by adjusting the vehicle software; manual lowering led to less effective results.

Based on these results, as many public transport companies as possible should examine the extent to which the temperature in passenger compartments can be permanently reduced to save energy, considering the duration of the journey and vehicle characteristics.

According to initial projections based on number of vehicles, a reduced passenger compartment temperature could save up to 38 GWh of electrical energy per year for public transport companies in Switzerland. Due to costs for the changes, implementation is probably only possible on part of the fleet in the next 10 years. It is therefore assumed that around 60 % of the potential, or 20 to 25 GWh/year, can be realized by purchasing new vehicles or updating the vehicle software. This corresponds to about 1 % to 2 % of the total energy used for rail-bound public transport and trolleybuses.

The VöV working group "Sustainable Energy" will coordinate the further procedure within the public transport companies and, based on the results, develop recommendations for setpoint temperatures per transport function.

Zusammenfassung

Ausgangslage und Fragestellung

Der Vorstand des Verbands öffentlicher Verkehr (VöV) hat im Rahmen einer drohenden Energiemangel- lage am 9. September 2022 verschiedene kurzfristige Sofortmassnahmen beschlossen, unter anderem eine zeitlich begrenzte Absenkung der Sollwerttemperatur in den Fahrgasträumen des öffentlichen Ver- kehrs von November 2022 bis Ende Februar 2023.

Die meisten Transportunternehmen hatten diese Reduktionen entweder mittels geänderter Fahrzeugsoft- ware oder einer manuellen Einstellung durch die Kundenbegleiter umgesetzt. Damit stellt sich die Frage, wie die Fahrgäste die Temperaturabsenkung im öffentlichen Verkehr beurteilten.

- Hatten die Absenkungen einen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit?
- Hatten die Fahrgäste die Absenkung wahrgenommen?

Deshalb wurde im Zeitraum vom 26. Januar bis 10. März 2023 in einer Fahrgastbefragung das Tempera- turempfinden der Fahrgäste ermittelt. Dabei wurden Umfragen auf 10 Fahrzeugtypen bei sieben Transport- unternehmen im Fern-, Regional- und Ortsverkehr gemäss nachfolgender Tabelle durchgeführt.

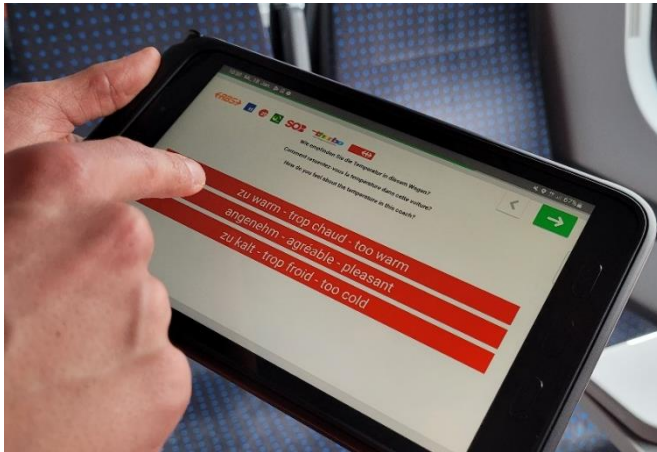
Liste der teilnehmenden Transportunternehmen und die im Fokus der Fahrgastbefragung stehenden Fahrzeuge.

| Verkehrs- funktion | Transport- unternehmen | Verkehrsmittel und Hauptstrecken | Bild |
|----------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| Fern- verkehr | SOB Südostbahn | Traverso, Aare Linth (Bern - Chur) |  |
| | SBB Schweizerische Bundesbahnen | IC2000, Ost-West |  |
| FV-Dosto (RABe 502), Ost-West | |  | |
| Regional- verkehr | RBS Regionalverkehr Bern-Solothurn | Worbla (Be 4/10), S-Bahn Bern Next (RABe 4/12), Bern – Solothurn |  |
| | Thurbo | GTW (RABe 526), Ostschweiz |  |
| | zb Zentralbahn | Spatz (Abe 130), Fink (ABeh 160), Luzern |  |
| | SBB Schweizerische Bundesbahnen | RV-Dosto (RABe511), Zürich - Bern |  |
| | | FLIRT (RABe523), Lausanne - Genf |  |
| Orts- verkehr | tl Transports lausannois | ACMV Be 4/6, m1: Lausanne (Flon) – Renens |  |
| | BVB Basler Verkehrsbetriebe | Cornichon (Be 4/4), innerhalb Basels |  |

Überblick der Umfragen und Temperaturmessung

Insgesamt wurde an 107 Befragungstagen rund 29'400 Fahrgäste befragt, dabei wurden rund 13'200 Antworten in Fernverkehrsfahrzeugen, 14'800 Antworten in Regionalverkehrsfahrzeugen und gut 1'400 Antworten im Ortsverkehr gewonnen.

Gleichzeitig zur Befragung der Fahrgäste wurde die Raumlufftemperatur durch die Befragenden mit Datenloggern erfasst. Die Logger zeichneten jede Minute einen Wert auf. Dies ermöglichte eine schnelle Befragung und eine Korrelation der gegebenen Antworten zu den gemessenen Raumlufftemperatur..



Befragung der Fahrgäste: Wurde die Temperatur als «zu warm», «angenehm» oder «zu kalt» empfunden?



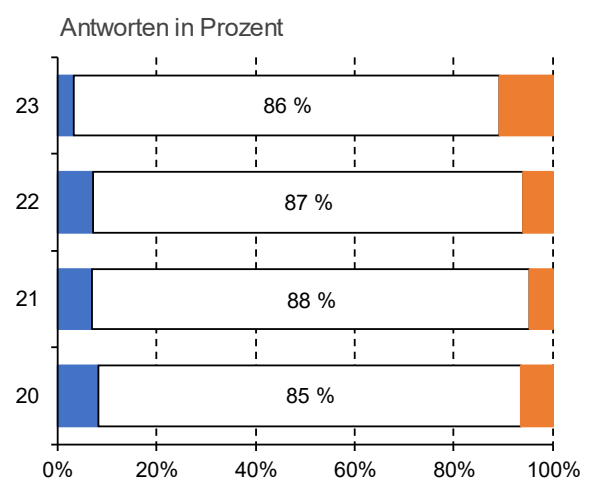
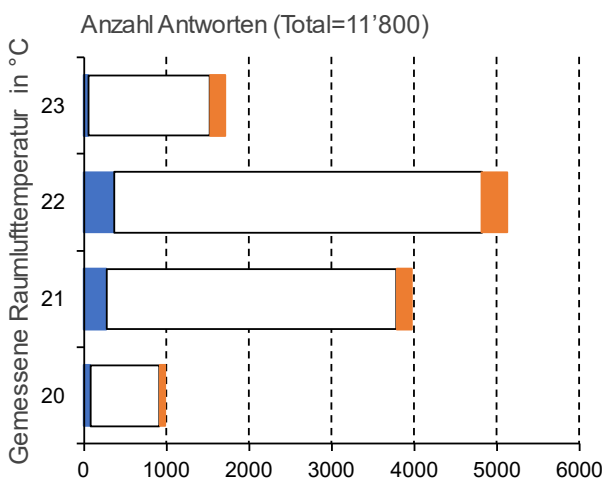
Parallel wurden die Fahrgastraumtemperaturen mit einem Datenlogger aufgezeichnet.

Ergebnisse zeigen Potenzial für Temperatursenkungen

Insgesamt ist die Zufriedenheit der Fahrgäste hoch (85 % und mehr) und unterscheidet sich im Fernverkehr bei Temperaturen zwischen 20 °C und 22 °C kaum. Im Regionalverkehr erreicht die Zufriedenheit bei Temperaturen zwischen 18 °C und 20 °C beste Werte (86 % und mehr), bei Aufenthaltsdauer unter 10 Minuten ist die Zufriedenheit auch bei 16 °C bis 17 °C weiterhin hoch (87 % und mehr).

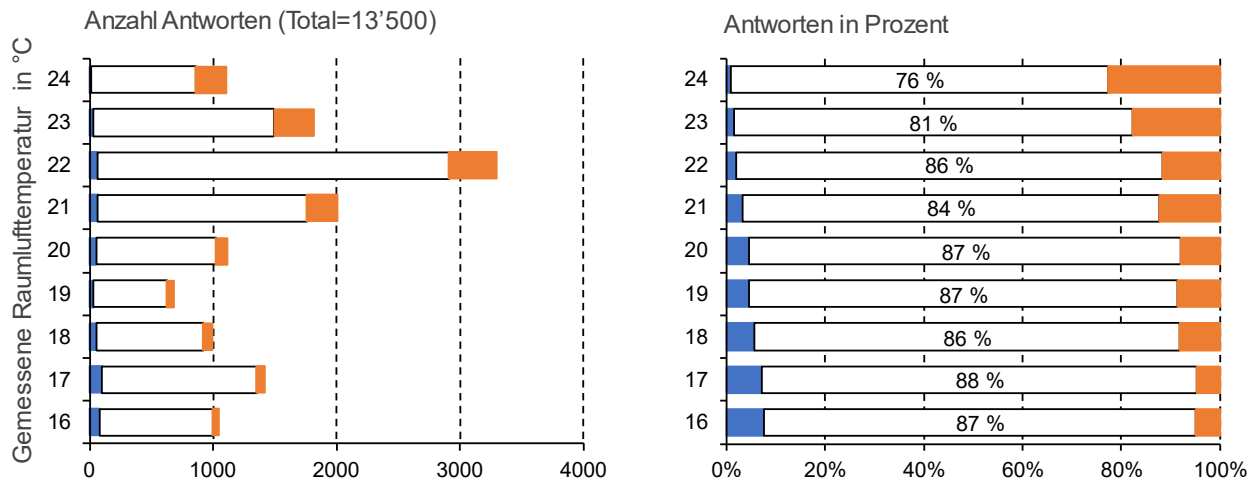
- Auffällig ist, dass der Anteil Fahrgäste mit Rückmeldungen «zu warm» im Regionalverkehr deutlich über dem Anteil Rückmeldungen «zu kalt» liegt.
- Weiter wurde beobachtet, dass mit Anpassung der Fahrzeugsoftware eine zuverlässige Absenkung der Fahrgastraumtemperatur erreicht werden konnte, die manuelle Absenkung führte zu weniger wirksamen Ergebnissen.

Die Aufteilung der Antworten auf die drei Zufriedenheitsstufen «zu kalt», «angenehm», und «zu warm» ist in den nachfolgenden Abbildungen (einmal für Fernverkehr, einmal für Regionalverkehr) ersichtlich.



Zufriedenheitswerte im **Fernverkehr** je Raumlufftemperaturniveau (blau: «zu kalt», weiss: «angenehm», orange: «zu warm»)

Der Anteil Antworten «angenehm» beträgt im **Fernverkehr** zwischen 20 °C und 23 °C Raumlufttemperatur 85 % oder mehr. Der Anteil Antworten «zu kalt» nimmt erwartungsgemäss mit steigender Raumtemperatur ab (von knapp 9.5 % bei 18 °C auf 2.5 % bei 24 °C), während der Anteil der Antworten «zu warm» zunimmt (von knapp 7.8 % bei 18 °C auf 12.5 % bei 24 °C).



Zufriedenheitswerte im **Regionalverkehr** je Raumlufttemperaturniveau (blau: «zu kalt», weiss: «angenehm», orange: «zu warm»)

Der Anteil Antworten «angenehm» beträgt im **Regionalverkehr** zwischen 16 °C und 22 °C Raumlufttemperatur 84 % oder mehr. Der Anteil Antworten «zu kalt» nimmt erwartungsgemäss mit steigender Raumlufttemperatur ab (von knapp 7.6 % bei 16 °C auf 1.9 % bei 22 °C), während der Anteil der Antworten «zu warm» zunimmt (von knapp 7.6 % bei 16 °C auf 1.9 % bei 22 °C).

Ein Teil der Messungen zeigt eine Häufung der gemessenen Raumlufttemperatur bei 17 °C. Diese Messungen lassen sich mehrheitlich auf Fahrzeuge der RBS zurückverfolgen.

Zusätzlich trägt die Regeltoleranz der HLK-Anlagen zur Streuung der Raumlufttemperatur bei. Die tatsächliche Regeltoleranz der HLK-Anlagen in Zügen beträgt üblicherweise zwischen ± 1 K bis ± 2 K auf den eingestellten Sollwert.

Beträchtliches Einsparpotenzial von Temperatursenkungen

Sowohl bei der vbz wie auch bei der SBB wurden Temperaturabsenkungen durchgeführt und die Reduktion des Energieverbrauchs gemessen. Für das untersuchte Tram der vbz ergibt sich bei einer Absenkung der Raumtemperatur um 2 K eine Einsparung von gut 11 MWh/a, bei dem untersuchten Regionalzug eine Energieeinsparung von rund 16 MWh/a.

Auf Basis dieser Messungen und der Gesamtzahl der Fahrzeuge im öffentlichen Verkehr gemäss Bundesamt für Statistik wurde eine erste Abschätzung für das Gesamtpotenzial durchgeführt. Das Potenzial der Energieeinsparung durch eine Reduktion der Raumlufttemperatur beträgt bis zu 38 GWh/Jahr. Bis 2035 erscheint eine Umsetzung auf 60 % der Fahrzeuge aufgrund der Kosten einer Änderung realistisch, was rund 23 GWh/Jahr Energieeinsparung entspricht. Damit kann der schienengebundene öV und die Trolleybusse mit einer Absenkung der Raumtemperatur rund 1 % - 1.7 % der gesamten durch die Fahrzeuge verbrauchten Energie einsparen.

| | | Fern- verkehr | Regional- verkehr | Tram | Trolleybusse | Summe |
|---|-----------------|------------------|----------------------|----------|--------------|--------------|
| Energiebedarf 2021 | GWh/Jahr | 648 | 1'342 | 154 | 78 | 2'222 |
| Anzahl Fahrzeuge (Wagenkasten / Fahrzeug) | Stück | 1'992 | 5'505 | 731 | 536 | 8'764 |
| Absenkung der Raumluft- temperatur | K | 1 | 2 - 3 | 2 - 3 | 2 - 3 | |
| Abschätzung: Energieein- sparung pro Wagenkasten / Fahrzeug | MWh/Jahr | 2.5 | 4 | 11 | 5 | |
| Gesamtpotenzial Energie- einsparung | GWh/Jahr | 5 | 22 | 8 | 3 | 38 |
| Potenzial bis 2035 Annahme: 60% realisierbar | GWh/Jahr | 3 | 13 | 5 | 2 | 23 |

Ausblick und Empfehlungen

In diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass im öffentlichen Verkehr die Raumlufttemperatur gesenkt werden kann, ohne dass die Zufriedenheit der Fahrgäste abnimmt. Zusätzlich kann mit einer Temperaturabsenkung Energie gespart werden.

Die Transportunternehmen sollen deshalb prüfen, inwieweit sie die Temperatur in den Fahrgasträumen senken können, resp. bereits realisierte Anpassungen der Raumlufttemperatur beibehalten können. Aus der vorliegenden Untersuchung ergeben sich folgende Empfehlungen.

Anpassung der Sollwerte der Raumtemperatur über Anpassung der Fahrzeugsoftware: Eine wirkungsvolle Umsetzung der Temperaturabsenkung muss durch eine Anpassung der Fahrzeugsoftware erfolgen. Der Effekt einer manuellen Absenkung der Temperatur war in den Messwerten nicht durchgehend nachvollziehbar, siehe auch Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2. Zusätzlich soll geprüft werden, ob eine separate Sollwertkennlinie für den Fall einer Energiemangellage sinnvoll ist, welche sich von der regulären Sollwertkennlinie unterscheidet.

Empfehlungen für Sollwerte der Raumtemperatur: Auf Basis der Umfrageergebnisse werden folgende Sollwerte der Raumtemperatur nach Verkehrsfunktion empfohlen.

- Für den **Fernverkehr** wird höchstens 21 °C als Sollwert der Raumtemperatur im Heizbetrieb empfohlen. Dies stellt eine Reduktion von mindestens 1 K gegenüber dem bisher üblichen Sollwert von 22 °C dar.
- Für den **Regionalverkehr** wird bis zu einer mittleren Reisedauer von 20 Minuten 19 °C als Sollwert der Raumtemperatur empfohlen. Dies ist eine Reduktion von 3 K gegenüber dem bisher üblichen Sollwert von 22 °C.
- Für den **Ortsverkehr** können aufgrund der geringen Anzahl Antworten keine direkten Empfehlungen abgeleitet werden. Es wird daher auf die Antworten aus dem Regionalverkehr mit Aufenthaltsdauer der Fahrgäste bis 10 Minuten verwiesen. Damit wird unter Berücksichtigung der Energieeffizienz 16 °C als Sollwert der Raumtemperatur für den Ortsverkehr empfohlen.

Berücksichtigung von Fahrzeugeigenschaften und Aufenthaltsdauer der Fahrgäste: Bei der Wahl der Temperatursollwerte sind unbedingt die individuellen Fahrzeugeigenschaften zu berücksichtigen. Beispielsweise beeinflussen Luftbewegung und Oberflächentemperatur die thermische Behaglichkeit ebenfalls in hohem Masse – bei gewissen Fahrzeugen ist deshalb eine Temperaturabsenkung nicht zweckmässig.

Überprüfung der Temperaturen mit Fahrgastumfragen: Es wird empfohlen, die angepassten Temperaturen mittels Fahrgastumfragen zu überprüfen, dabei hat sich das in diesem Projekt gewählte Vorgehen mit 1 oder 2 Kernfragen bewährt: Mit einer Befragung an zwei Tagen können mit vertretbarem Aufwand rund 3'000 Antworten gesammelt werden, so dass verlässliche Daten über die Wahrnehmung der Fahrgäste vorliegen.

Die VöV-Arbeitsgruppe «Nachhaltige Energie» wird das weitere Vorgehen innerhalb der Branche koordinieren und auf Basis der Ergebnisse möglichst branchenweite Empfehlungen für Sollwerte der Raumlufttemperatur je Verkehrsfunktion erarbeiten.

Résumé

Situation initiale et problématique






Dans le cadre d'une menace de pénurie d'énergie, le Comité de l'Union des transports publics (UTP) a décidé, le 9 septembre 2022, de prendre différentes mesures immédiates à court terme, notamment l'abaissement de la température de consigne dans les compartiments voyageurs des transports publics de novembre 2022 à fin février 2023.

La plupart des entreprises de transport ont mis en œuvre ces abaissements soit en modifiant le logiciel des véhicules, soit en demandant aux assistantes et assistants clientèle de procéder à un réglage manuel. Il s'agit alors de savoir comment les voyageuses et voyageurs ont évalué la baisse de température dans les transports publics.

- Les abaissements de la température ont-ils eu une influence sur le confort thermique ?
- Les voyageuses et voyageurs ont-ils perçu l'abaissement de la température ?

Entre le 26 janvier et le 10 mars 2023, une enquête a donc été menée auprès des voyageuses et voyageurs afin de déterminer leur perception de la température. Pour ce faire, des enquêtes ont été réalisées sur dix types de véhicules auprès de sept entreprises de transport pour les trafics grandes lignes, régional et local, conformément au tableau ci-dessous.

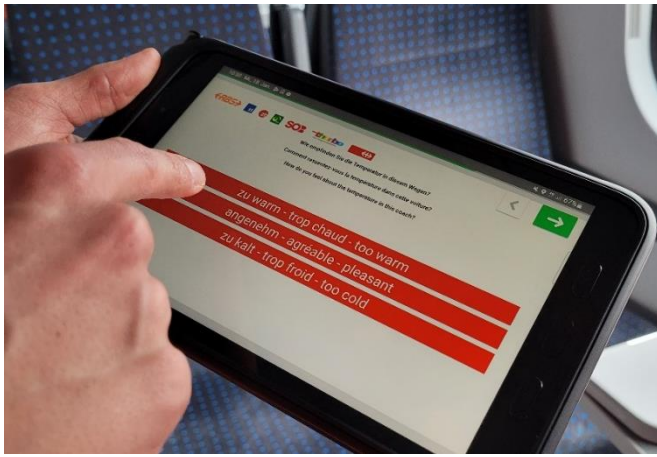
Liste des entreprises de transport participantes et des véhicules ciblés par l'enquête auprès des voyageuses et voyageurs.

| Fonction de transport | Entreprise de transport | Moyen de transport et lignes principales | Photo | |
|-----------------------|--|---|---|--|
| Trafic grandes lignes | SOB Südostbahn | Traverso, Aare Linth (Bern - Chur) |  | |
| | SBB Schweizerische Bundesbahnen | IC2000, Ost-West |  | |
| | | FV-Dosto (RABe 502), Ost-West |  | |
| | RBS Regionalverkehr Bern-Solothurn | Worbla (Be 4/10), S-Bahn Bern Next (RABe 4/12), Bern – Solothurn |  | |
| Trafic régional | Thurbo | GTW (RABe 526), Ostschweiz |  | |
| | SBB Schweizerische Bundesbahnen | zB Zentralbahn | Spatz (ABe 130), Fink (ABeh 160), Luzern |  |
| | | RV-Dosto (RABe511), Zürich - Bern |  | |
| | FLIRT (RABe523), Lausanne - Genf |  | | |
| Trafic local | tI Transports lausannois | ACMV Be 4/6, m1: Lausanne (Flon) – Renens |  | |
| | BVB Basler Verkehrsbetriebe | Cornichon (Be 4/4), innerhalb Basels |  | |

Vue d'ensemble des enquêtes et mesure de la température

Au cours de 107 journées d'enquête, environ 29 400 voyageuses et voyageurs ont été interrogés au total. On dénombre environ 13 200 réponses dans les véhicules du trafic grandes lignes, 14 800 dans ceux du trafic régional et un peu plus de 1400 dans ceux du trafic régional.

En parallèle à l'enquête auprès des voyageuses et voyageurs, la température ambiante a été enregistrée par les enquêteuses et enquêteurs à l'aide d'enregistreurs de données. Ces derniers enregistrent une valeur toutes les minutes, ce qui a permis d'avancer rapidement dans l'enquête et de mettre en corrélation les réponses données avec la température ambiante mesurée.



Enquête auprès des voyageuses et voyageurs: la température ressentie est-elle «trop chaude», «agréable» ou «trop froide»?



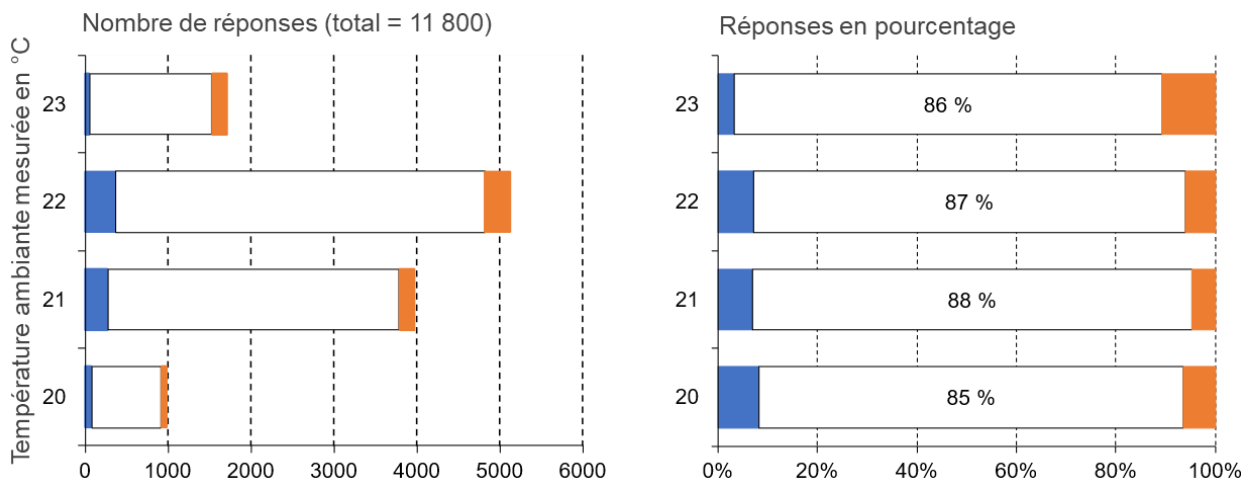
En parallèle, la température des compartiments voyageurs était mesurée à l'aide d'un enregistreur de données.

Les résultats mettent en évidence un potentiel d'abaissement de la température

Dans l'ensemble, le taux de satisfaction des voyageuses et voyageurs est élevé (85% et plus) et ne varie guère en trafic grandes lignes lorsque la température est comprise entre 20° C et 22° C. C'est en trafic régional que le taux de satisfaction est le plus élevé (86% et plus) avec des températures comprises entre 18° C et 20° C; il reste élevé quand les voyageuses et voyageurs passent moins de 10 minutes dans le train (87% et plus), même avec des températures comprises entre 16° C et 17° C.

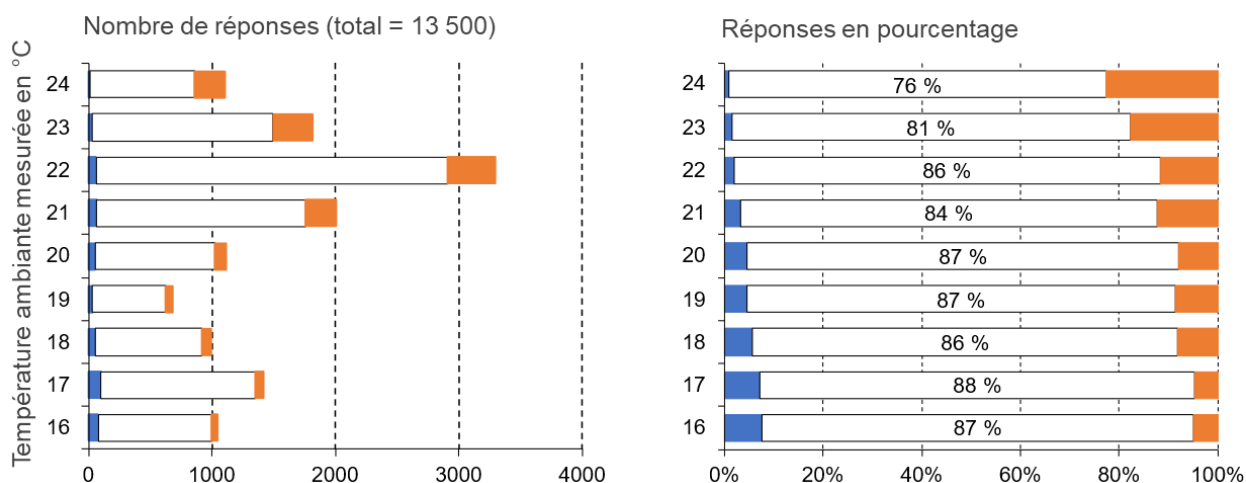
- Il est frappant de constater que la part des passagers ayant signalé avoir « trop chaud » est nettement supérieure à celle des passagers ayant signalé avoir « trop froid » dans le trafic régional.
- De plus, on observe que l'adaptation du logiciel des véhicules permet d'obtenir un abaissement fiable de la température du compartiment voyageurs, alors que l'abaissement manuel donne des résultats moins efficaces.

La répartition des réponses entre les trois niveaux de satisfaction « trop froid », « agréable » et « trop chaud » est visible dans les graphiques ci-dessous (l'un pour le trafic grandes lignes, l'autre pour le trafic régional).



Niveaux de satisfaction en **trafic grandes lignes** par niveau de température ambiante (bleu: «trop froid», blanc: «agréable», orange: «trop chaud»)

La part de réponses pour la catégorie « agréable » est de 85% ou plus en **trafic grandes lignes** avec une température ambiante comprise entre 20° C et 23° C. Comme on pouvait s'y attendre, la part de réponses pour la catégorie « trop froid » diminue à mesure que la température ambiante augmente (elle passe d'environ 9,5% avec une température de 18° C à 2,5% avec une température de 24° C), tandis que la proportion de réponses pour la catégorie « trop chaud » augmente (elle passe d'environ 7,8% avec une température de 18° C à 12,5% avec une température de 24° C).



Niveaux de satisfaction en **trafic régional** par niveau de température ambiante (bleu: « trop froid », blanc: « agréable », orange: « trop chaud »)

La part de réponses pour la catégorie « agréable » est de 84% ou plus en **trafic régional** avec une température ambiante comprise entre 16° C et 22° C. Comme on pouvait s'y attendre, la part de réponses pour la catégorie « trop froid » diminue à mesure que la température ambiante augmente (elle passe d'environ 7,6% avec une température de 16° C à 1,9% avec une température de 22° C), tandis que la proportion de réponses pour la catégorie « trop chaud » augmente (elle passe d'environ 7,6% avec une température de 16° C à 1,9% avec une température de 22° C).

Une partie des mesures montre une multiplication de la température ambiante mesurée à 17° C. Ces mesures peuvent pour la plupart être attribuées à des véhicules de la RBS.

De plus, la tolérance de régulation des installations CVC contribue à la dispersion de la température ambiante. La tolérance de régulation effective des installations CVC dans les trains se situe généralement entre ± 1 K et ± 2 K par rapport à la valeur de consigne définie.

Le potentiel d'économie considérable lié à l'abaissement de la température

La température a été abaissée tant chez VBZ qu'aux CFF, et la réduction de la consommation d'énergie a été mesurée. Une baisse de la température ambiante de 2 K permet une économie légèrement supérieure à 11 MWh/an pour le tram VBZ examiné et une économie d'énergie d'environ 16 MWh/an pour le train régional considéré.

Une première estimation du potentiel global a été réalisée sur la base de ces mesures et du nombre total de véhicules des transports publics selon l'Office fédéral de la statistique. Le potentiel maximal d'économie d'énergie obtenu grâce à une réduction de la température ambiante s'élève à 38 GWh/an. D'ici 2035, une mise en œuvre sur 60% des véhicules semble réaliste en raison du coût d'une modification, ce qui correspond à environ 23 GWh/an d'énergie économisée. Ainsi, les transports publics sur rails et les trolleybus peuvent économiser entre 1% et 1,7% environ de l'énergie totale consommée par les véhicules en diminuant la température ambiante.

Première estimation du potentiel d'une température ambiante abaissée (valeurs $\pm 50\%$).

| | | TGL | TR | Tram | Trolleybus | Total |
|---|---------------|----------|-----------|----------|------------|-------------|
| Besoin en énergie 2021 | GWh/an | 648 | 1342 | 154 | 78 | 2222 |
| Nombre de véhicules (caisse de voiture/véhicule) | Pièce | 1992 | 5505 | 731 | 536 | 8764 |
| Abaissment de la température ambiante | K | 1 | 2-3 | 2-3 | 2-3 | |
| Estimation: économie d'énergie par caisse de voiture/véhicule | MWh/an | 2,5 | 4 | 11 | 5 | |
| Potentiel total d'économies d'énergie | GWh/an | 5 | 22 | 8 | 3 | 38 |
| Potentiel jusqu'en 2035 | | | | | | |
| Hypothèse: 60% réalisables | GWh/an | 3 | 13 | 5 | 2 | 23 |

Perspectives et recommandations

Ce projet a permis de montrer qu'il était possible de réduire la température ambiante dans les transports publics sans nuire à la satisfaction des voyageuses et voyageurs. Par ailleurs, un abaissement de la température permet d'économiser l'énergie.

Les entreprises de transport doivent donc examiner dans quelle mesure elles peuvent réduire la température dans les compartiments voyageurs ou maintenir les ajustements de la température ambiante déjà effectués. Les recommandations suivantes découlent de la présente étude.

Modification des valeurs de consigne de la température ambiante par le biais d'une adaptation du logiciel des véhicules: une mise en œuvre efficace de l'abaissement de la température doit passer par une adaptation du logiciel des véhicules. L'effet d'un abaissement manuel de la température ne s'est pas systématiquement reflété dans les valeurs mesurées (voir également les chapitres 5.1 et 5.2). En outre, il convient d'examiner s'il pourrait être judicieux de définir une caractéristique de consigne spécifique à une situation de pénurie d'énergie, qui serait différente de la caractéristique de consigne classique.

Recommandations pour les valeurs de consigne de la température ambiante: sur la base des résultats de l'enquête, les valeurs de consigne suivantes pour la température ambiante sont recommandées selon la fonction de transport.

- En **trafic grandes lignes**, il est recommandé de ne pas dépasser 21° C comme valeur de consigne pour la température ambiante quand le chauffage fonctionne. Cela représente une réduction d'au moins 1 K par rapport à la valeur de consigne de 22° C appliquée jusqu'à présent.
- En **trafic régional**, la température de consigne recommandée pour une durée de voyage moyenne de 20 minutes au maximum est de 19° C, ce qui représente une réduction de 3 K par rapport à la valeur de consigne de 22° C appliquée jusqu'à présent.
- En raison du faible nombre de réponses, aucune recommandation directe ne peut être formulée pour le **trafic local**. Il est donc conseillé de se reporter aux réponses du trafic régional avec des durées de voyage de 10 minutes au maximum. Ainsi, compte tenu de l'efficacité énergétique, 16° C est la valeur de consigne recommandée pour la température ambiante en trafic local.

Prise en compte des caractéristiques des véhicules et de la durée de voyage: il faut impérativement prendre en compte les caractéristiques individuelles de chaque véhicule afin de choisir les valeurs de consigne pour la température. À titre d'exemple, le mouvement de l'air et la température de surface influencent aussi fortement le confort thermique. Pour certains véhicules, un abaissement de la température n'est donc pas approprié.

Contrôle des températures par le biais d'enquêtes auprès des voyageuses et voyageurs: il est recommandé de contrôler les températures adaptées au moyen d'enquêtes auprès des voyageuses et voyageurs. À cet égard, la procédure retenue dans le cadre de ce projet, axée sur une ou deux questions centrales, a fait ses preuves: une enquête menée sur deux jours permet de recueillir environ 3000 réponses pour un coût raisonnable et de disposer ainsi de données fiables sur la perception des voyageuses et des voyageurs.

Le groupe de travail « Énergie durable » de l'UTP coordonnera la suite de la procédure au sein de la branche et élaborera, sur la base des résultats obtenus, des recommandations pour les températures de consigne par fonction de transport, si possible applicables à l'échelle de la branche.

Inhalt

| | |
|---|----|
| Executive Summary | 2 |
| Résumé exécutif | 3 |
| Executive Summary | 4 |
| Zusammenfassung | 5 |
| Résumé | 9 |
| 1 Ausgangslage | 15 |
| 2 Ziel der Arbeit | 15 |
| 3 Forschungsansatz und aktueller Wissensstand | 16 |
| 3.1 Thermische Behaglichkeit | 16 |
| 3.2 Bewertung thermische Behaglichkeit | 17 |
| 4 Vorgehen und Methodik | 18 |
| 4.1 Transportunternehmen und Fahrzeugtypen | 18 |
| 4.2 Erfassung von Fahrgasteinschätzung und Temperatur | 20 |
| 4.3 Limitierung der Datenerhebung | 22 |
| 4.4 Statistische Aussagekraft | 22 |
| 4.5 Datenkorrektur | 23 |
| 4.6 Standardisieren der Temperaturmessungen | 23 |
| 5 Ergebnisse | 25 |
| 5.1 Thermische Behaglichkeit im Fernverkehr | 25 |
| 5.2 Thermische Behaglichkeit im Regionalverkehr | 28 |
| 5.3 Thermische Behaglichkeit im Ortsverkehr | 31 |
| 6 Energieeinsparungen aufgrund von Temperaturabsenkungen | 32 |
| 6.1 Beispiel DTZ-Triebzug der SBB (RABe 514) | 32 |
| 6.2 Beispiel Cobra-Tram der vbz (Be 5/6) | 36 |
| 6.3 Gesamtpotenzial Energieeinsparung | 37 |
| 7 Diskussion | 39 |
| 8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen | 40 |
| 8.1 Empfehlungen für Transportunternehmen | 40 |
| 8.2 Ausblick für weitere wissenschaftliche Untersuchungen | 41 |
| 9 Anhang | 42 |
| 9.1 Glossar / Abkürzungsverzeichnis | 42 |
| 9.2 Literaturverzeichnis | 42 |
| 9.3 Daten für weitere Forschungen | 43 |
| 9.4 Screenshots des Umfragetools | 44 |

1 Ausgangslage

Sowohl die Verkehrsbetriebe Zürich (vbz) wie auch die SBB führten in den letzten Jahren je eine Fahrgastumfrage zur thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur in den Fahrzeugen durch.

- Die SBB führte im Januar und Februar 2018 gemeinsam mit der HSLU eine Befragung der Fahrgäste in der S-Bahn Zürich durch (Doppelstockwagen «DPZ+» der S-Bahn Zürich, teils mit 20 °C Solltemperatur, teils mit 22 °C). Die Doppelblindbefragungen (vgl. Glossar) mit 3'662 Antworten zeigte, dass die Mehrheit der befragten Fahrgäste eine Temperatursenkung im Winter auf 20 °C befürwortet [1].
- Die vbz teilte 30 Trams vom Typ «Cobra» in drei Gruppen betreffend Sollwerte der Raumlufttemperatur im Heizbetrieb ein: 20 °C, 18 °C und 16 °C. Die Fahrgäste konnten via QR-Code den wahrgenommenen Komfort rückmelden («zu warm», «angenehm», «zu kalt»). Hier zeigte sich, wie bei den SBB, dass die tieferen Temperaturen die thermische Behaglichkeit nicht negativ beeinflusst [2].

Es stellt sich die Frage, ob diese beiden Befunde zufällig sind oder ob sich ein ähnliches Bild über den gesamten öffentlichen Verkehr ergibt.

Am 9. September 2022 hat der Vorstand des Verbandes des öffentlichen Verkehrs (VöV) im Rahmen der Energiemangellage eine Reihe von Massnahmen beschlossen [3]. Unter anderem wurde den Transportunternehmen empfohlen zwischen Anfang November 2022 und Ende Februar 2023 die Temperatur in den Fahrgasträumen von Orts-, Regional- und Fernverkehr abzusenken. In den meisten Fällen sind dies 2 K, teils sind es auch bis zu 4 K. Diese Absenkungen erfolgten entweder manuell nach «best effort» durch das Zugpersonal oder durch eine dauerhafte Anpassung der Steuerungssoftware.

In dieser speziellen Situation der grossangelegten Temperaturabsenkungen im öffentlichen Verkehr konnte mit vertretbarem Aufwand schweizweit im Orts-, Regional- und Fernverkehr untersucht werden, welchen Einfluss eine reduzierte Raumlufttemperatur auf die thermische Behaglichkeit der Fahrgäste hat.

Wenn der Anteil an unzufriedenen Fahrgästen mit der reduzierten Raumlufttemperatur nicht grösser ist als bei den bisherigen Sollwerten der Raumlufttemperatur von rund 22 °C, könnte eine grossflächige Temperaturabsenkung als Energiesparmassnahme auch längerfristig realisiert werden.

2 Ziel der Arbeit

Es wird vermutet, dass die Zufriedenheit der Reisenden in einem gewissen Bereich der Raumlufttemperatur konstant ist. Sollte sich die Hypothese bestätigen, so könnte eine Absenkung der Raumlufttemperatur bei Schienenfahrzeugen eine geeignete Massnahme sein, welche einerseits die Zufriedenheit der Reisenden nicht beeinträchtigt und andererseits einen Beitrag dazu leistet, die Energiesparziele der Branche zu erreichen.

Die vorliegende Untersuchung hatte deshalb zum Ziel, die Fahrgastzufriedenheit bezüglich Raumlufttemperatur im Winter zu erfassen, damit die oben genannte Hypothese fundiert gestützt oder verworfen werden kann. Ebenso soll sie abschätzen, wie hoch das Energiesparpotenzial im öffentlichen Verkehr ausfällt, wenn die Sollwerte der Raumlufttemperatur flächendeckend eingeführt würden.

3 Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

3.1 Thermische Behaglichkeit

Ein Überblick über mögliche Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit des Menschen wird in Abbildung 1 gegeben. Von den 21 Faktoren werden sechs als primäre und dominierende, acht weitere als zusätzliche und die restlichen sieben als sekundäre und vermutete Faktoren eingestuft. Die primären Einflussgrößen sind für das Wohlbefinden dominierende wichtige Faktoren. Bei den sekundären Faktoren wird angenommen, dass deren Einfluss auf die thermische Behaglichkeit einen deutlich geringeren Einfluss als die primären Faktoren haben.

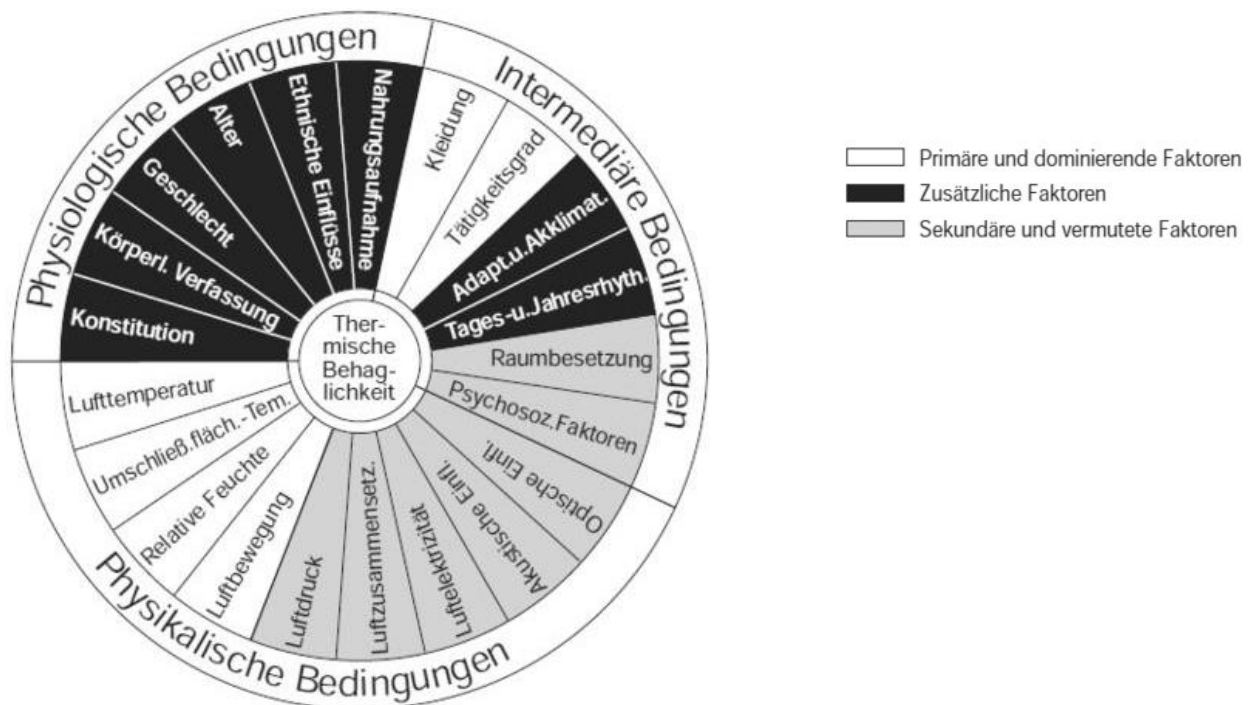


Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit [4]

Gemäss der Übersicht werden als primäre und dominierende Faktoren für die thermische Behaglichkeit die folgenden sechs genannt:

- Kleidung
- Tätigkeitsgrad
- Lufttemperatur
- Temperatur der Umschliessungsflächen
- Relative Luftfeuchte
- Luftbewegung

Die Kleidung und der Tätigkeitsgrad sind dabei subjektive Faktoren und können nur von den jeweiligen Personen selbst beeinflusst werden. Die primären physikalischen Faktoren wie Lufttemperatur, Temperatur der Umschliessungsflächen, relative Luftfeuchte und Luftbewegung sind mittels technischer Einrichtungen beeinflussbare Faktoren und können durch entsprechende Massnahmen an der Fahrzeughülle oder technische Konzepte und Systeme reguliert werden.

Im ganzheitlichen Sinne ist es aber auch notwendig, neben der Betrachtung der massgebenden Parameter, ebenso die sekundären Einflussfaktoren zu berücksichtigen, da diese für die Fahrgastzufriedenheit und Akzeptanz ebenso unabdingbar sind. Dazu gehören unter anderem:

- Luftqualität (bspw. Staubgehalt, Gerüche),
- Akustische Einflüsse (bspw. Lärm),
- Optische und haptische Einflüsse (bspw. Materialien, Farbgebung),
- Räumliches Empfinden (bspw. Platzangebot, Raumatmosphäre),
- Beleuchtung,
- Aussicht,
- etc.

3.2 Bewertung thermische Behaglichkeit

«Thermische Behaglichkeit ist gegeben, wenn eine Person die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Luftbewegung und die Wärmestrahlung der Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht.» [5].

In Innenräumen kann die thermische Behaglichkeit nach der Norm EN ISO 7730 [6] bewertet werden. Die Beurteilung erfolgt auf analytischer Bestimmung durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit [7].

Mit den in der Norm beschriebenen Verfahren kann das allgemeine Wärmeempfinden des Menschen sowie der Grad der Unbehaglichkeit (thermische Unzufriedenheit) von Personen bestimmt werden. Dies erfolgt durch die Berechnung der erwarteten durchschnittlichen Empfindung PMV und vorhergesagter Prozentsatz PPD sowie den Umgebungsbedingungen.

PMV (predicted mean vote)

Das Wärmeempfinden des Menschen ist abhängig vom thermischen Gleichgewicht des gesamten Körpers (Wärmebilanz). Dieses wird durch den Aktivitätsgrad, die Bekleidung sowie durch das Umgebungsklima bestimmt. Beim Umgebungsklima spielen dabei insbesondere die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit und die Luftfeuchte eine wichtige Rolle. Sind all diese Faktoren bekannt, kann das Wärmeempfinden des Körpers vorausgesagt werden. Die Empfindung ist in sieben Punkte von kalt (-3) bis heiss (+3) eingeteilt (Abbildung 2).

PPD (predicted percentage of dissatisfied)

Mit dem PPD kann der Prozentsatz an Menschen bestimmt werden, die ein bestimmtes Umgebungsklima wahrscheinlich als unbehaglich, d.h. zu warm oder zu kalt, empfinden. Der PPD lässt sich aus dem PMV berechnen. In Abbildung 2 ist der Zusammenhang zwischen PMV und PPD dargestellt.

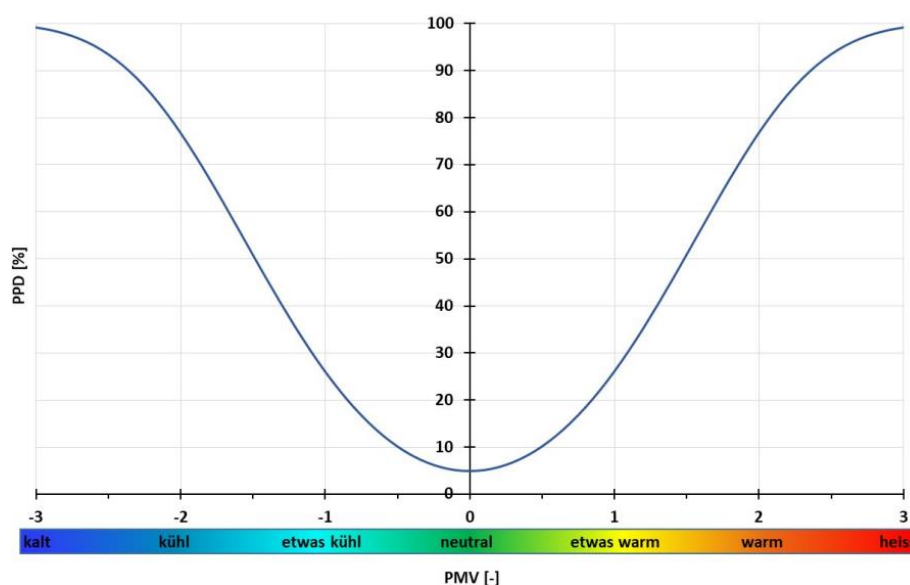


Abbildung 2: PPD als Funktion des PMV gemäss EN ISO 7730 [6]

Da es aufgrund des subjektiven Empfindens jedes Menschen immer einen Teil von 5 % an unzufriedenen Personen gibt, wird ein PPD von 0 nie erreicht.

Für die Berechnung des PMV und PPD werden folgende Einflüsse berücksichtigt:

Aktivitätsgrad:

Der Aktivitätsgrad des Menschen hat einen grossen Einfluss auf das Wärmeempfinden. Je höher die physische Tätigkeit, desto höher ist die Wärmeproduktion im Körper. Im öffentlichen Verkehr ist davon auszugehen, dass die Personen während der Fahrt überwiegend sitzen oder z.T. auch stehen. Das würde einer Wärmeproduktion von 58 bis 93 W/(m² Hautfläche) – also etwa zwischen 100 und 180 W/Person - entsprechen.

Bekleidung:

Die Bekleidung stellt die Schicht zwischen Körper und Raumklima dar und hat somit ebenso einen direkten Einfluss auf den Wärmehaushalt des Menschen. Die Bekleidung wirkt somit als Isolierschicht und führt zu einem entsprechenden Wärmewiderstand. Im Gegensatz zum Gebäude, wo die Bekleidung meist ähnlich ist, sind im öffentlichen Verkehr grössere Abweichungen von einem Mittelwert zu erwarten. Je nach Jahreszeit (Sommer / Winter) sowie der Fahrzeit (Kurz- / Langstrecke) kann die Bekleidung der einzelnen Personen stark schwanken. Dies führt zu einer höheren Komplexität, wenn für möglichst viele Personen ein behagliches Klima bereitgestellt werden soll.

Umgebungs-klima:

Das Umgebungs-klima wird insbesondere durch die Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur der raumumschliessenden Oberflächen, der Luftbewegung sowie der Luftfeuchtigkeit bestimmt. Welche Anforderungen an diese Kriterien gestellt werden, ist abhängig vom Aktivitätsgrad und der Bekleidung.

Eine Übersicht, weitere Details sowie Vorschläge zur Verbesserung des Komforts ist in «thermische Behaglichkeit und Normen im öffentlichen Verkehr» [8] sowie im «Synthesebericht Energieeffizienz im Bereich Heizung, Lüftung, Klima und Fahrzeughülle im öffentlichen Verkehr» [9] zu finden.

4 Vorgehen und Methodik

4.1 Transportunternehmungen und Fahrzeugtypen

Insgesamt nahmen sieben TU an dem Projekt teil (Tabelle 1). Die Spannweite reichte vom Ortsverkehr (BVB, tl) bis zum Fernverkehr (SBB, SOB). Auch wurden mit Trams / Metros, Regional- und Fernverkehrszügen verschiedene Verkehrsfunktionen berücksichtigt. Damit wurde ein repräsentativer Querschnitt für den schienengebundenen Personenverkehr erreicht.

Sowohl die Fahrzeugtypen, in welchen befragt werden soll, als auch die zu benützenden Fahrstrecken wurden durch die TU festgelegt. Die gefahrenen Strecken gehen aus der Abbildung 3 hervor.

Die Fahrzeugtypen wurden in die drei Verkehrsfunktionen (Fernverkehr, Regionalverkehr, Ortsverkehr [10]) eingeteilt. Sowohl die Fahrzeugtypen wie deren Zuordnung sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabella 1: Liste der teilnehmenden Transportunternehmen und die im Fokus der Fahrgastbefragung stehenden Fahrzeuge.

| Verkehrsfunktion | Transportunternehmen | Verkehrsmittel und Hauptstrecken | Bild |
|------------------|--|--|---|
| Fernverkehr | SOB Südostbahn | Traverso, Aare Linth (Bern - Chur) |  |
| | SBB Schweizerische Bundesbahnen | IC2000, Ost-West |  |
| | | FV-Dosto (RABe 502), Ost-West |  |
| Regionalverkehr | RBS Regionalverkehr Bern-Solothurn | Worbla (Be 4/10), S-Bahn Bern NEXT (RABe 4/12), Bern - Solothurn |  |
| | Thurbo | GTW (RABe 526), Ostschweiz |  |
| | zb Zentralbahn | Spatz (ABe 130), Fink (ABeh 160), Luzern |  |
| | | SBB Schweizerische Bundesbahnen | RV-Dosto (RABe511), Zürich - Bern |
| | FLIRT (RABe523), Lausanne - Genf | |  |
| Ortsverkehr | tl Transports lausannois | ACMV Be 4/6, m1: Lausanne (Flon) – Renens |  |
| | BVB Basler Verkehrsbetriebe | Cornichon (Be 4/4), innerhalb Basels |  |



Abbildung 3: Streckennetz der Schweizer Eisenbahnen. Gelb markiert sind Streckenabschnitte auf denen Befragungen durchgeführt wurden.

4.2 Erfassung von Fahrgasteinschätzung und Temperatur

Umfragetool

Die Doppelblindumfrage (siehe Glossar) wurde mit von der SBB zur Verfügung gestellten Tablets und einem von der SBB zur Verfügung gestellten Umfragetool «QuickTapSurvey» [11] durchgeführt. Der Ablauf der Befragung ist im Anhang (Kapitel 9.4 ab Seite 44) grafisch beschrieben. Die Befragenden erfassten jeweils Wetterbedingungen (beim Betreten eines «neuen» Zuges), die Fahrzeugnummer und das Wagenlayout (i.e. ein- oder zweistöckig), die Klasse und die Position im Wagen (oben, unten, Mitteldeck, 1. Klasse, 2. Klasse) und schätzten die Belegung (25%, 50%, 75% 100%). Danach gingen sie durch das Fahrzeug und stellten den Fahrgästen zwei Fragen (siehe auch Abbildung 4):

- Wie empfinden Sie die Temperatur in diesem Wagen?
- Wie lange reisen Sie schon in diesem Zug?

Alle Eingaben wurden nur durch die Befragenden erfasst. Bei Abteilwechsel, spätestens aber nach 25 Antwortpaaren wurden die Antworten automatisch georeferenziert abgespeichert und in die Cloud des Umfragetool-Anbieters übertragen.

Um möglichst viele Rückmeldungen von Fahrgästen sammeln zu können, wurde darauf verzichtet, weitere mögliche Einflussgrößen (Geschlecht, Alter, Bekleidung etc.) zu erheben.

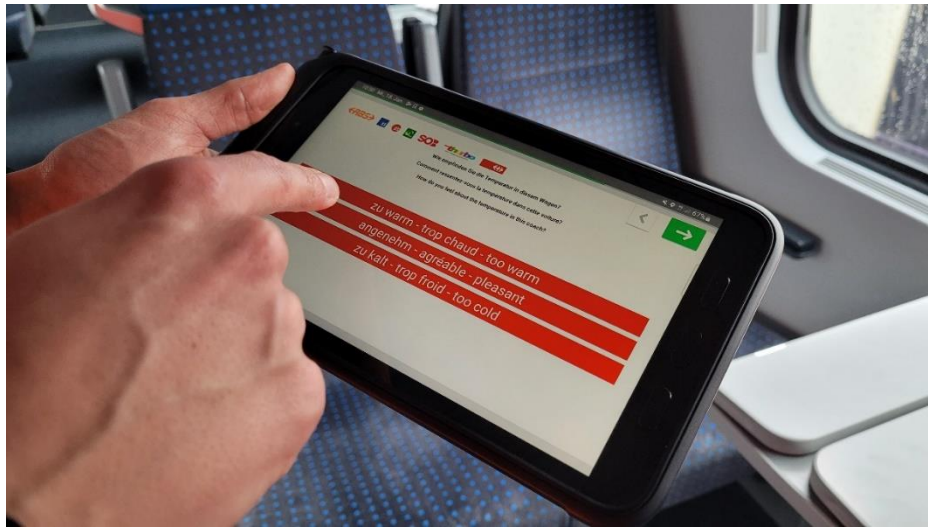


Abbildung 4: Blick auf das Umfragetool und eine Frage an die Fahrgäste.

Raumlufttemperaturmessung

Um die Raumlufttemperatur der Fahrzeuge zu erfassen, trugen die Befragenden in der Aussentasche ihres Rucksacks einen Temperaturlogger vom Typ TinyTag Talk 2 (Gemini) [12] mit. Die Messspitze des Temperaturloggers war etwa auf Hüfthöhe des Befragers rund 30 cm vom Körper weg befestigt, siehe auch Abbildung 5. Diese Temperatursensoren waren kalibriert und wurden von SBB zur Verfügung gestellt.

Die Temperaturlogger zeichneten jede Minute einen Wert auf. Dies ermöglichte es, schnell mit der Befragung voranzuschreiten und trotzdem die Temperatur etwa auf Schulterhöhe der Reisenden zu erfassen.



Abbildung 5: Messspitze eines Temperaturloggers zur Messung der Raumlufttemperatur durch die Befragenden in einem Fahrzeug während der Fahrgastbefragung.

Die Temperaturlogger wurde jeweils nach maximal fünf Einsatztagen durch die HSLU ausgelesen, neu programmiert und fallweise wieder in Umlauf gebracht.

Zusammenführen der Daten

Die Befragenden notierten jeweils am Tagesanfang mit welchem Tablet und mit welchem Temperaturlogger sie unterwegs waren. Weil zuvor sichergestellt wurde, dass die internen Uhren der Logger und der Tablets synchron liefen, konnten die Daten des Umfragetools und die Messdaten der Temperaturlogger mittels Zeitstempel zusammengeführt werden.

4.3 Limitierung der Datenerhebung

Die Bewertung des thermischen Komforts nach Fanger gilt für gesunde Männer und Frauen in einem Aufenthaltsbereich mit Fokus einer Büroumgebung, welche üblicherweise grössere Abstände zu kalten Oberflächen (wie zum Beispiel Fenster) als in Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs aufweisen. Im Gebäude wird in der Norm SIA 180:2014 [13] für den Aufenthaltsbereich ein Abstand von 1 m zu Aussenfenstern und Türen definiert. Eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit mittels PMV oder PPD ist deshalb in dieser Studie nicht ohne weiteres möglich. Für diese Berechnungen hätten die entsprechenden Daten wie Strahlungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Oberflächentemperatur, Luftgeschwindigkeiten, Bekleidung sowie die Position der befragten Person erfasst werden müssen. Einige Daten wie Luftgeschwindigkeit und Strahlungstemperaturen bedingen eine aufwendige Messeinrichtung. Im normalen Fahrpläneinsatz mit Fahrgästen sind diese Messungen ohne zusätzliche Massnahmen wie Begleitung oder Absperrung der Messeinrichtung nicht möglich.

4.4 Statistische Aussagekraft

Die Umfrage wurde zu verschiedenen Tageszeiten und an verschiedenen Wochentagen durchgeführt, um eine breite Streuung zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden spezifische Zeiträume wie (Schul-)Ferien und Feiertage berücksichtigt, um eine ausgewogene Zufallsstichprobe zu erzeugen.

Um die Genauigkeit der Anteile für die Frage nach der Zufriedenheit mit der Raumlufttemperatur der Gesamtheit der Fahrgäste zu beurteilen, kann aus der Grösse der Teilstichprobe ein Vertrauensintervall (vgl. Glossar) mit der nachstehenden Formel berechnet werden:

$$VI = \pm z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad [14]$$

Darin bedeuten: VI: Vertrauensintervall, $z_{\alpha/2}$: Konstante je Vertrauensniveau (für 95%iges Vertrauen beträgt sie 1.96), p: Anteil positiver Antworten, n: Anzahl Antworten der Stichprobe

Diese Vertrauensintervalle schwanken somit je nach Grösse der Teilstichprobe und des Anteils Antworten «angenehm». Damit ein 95-prozentiges Vertrauensintervall bei einem Anteil «angenehm» von 86 % (dies entspricht dem Anteil «angenehm» aller 29'400 Antworten) erreicht wird, benötigt man demzufolge mindestens die in der nachfolgenden Tabelle 2 angegebene Anzahl Antworten.

Tabelle 2: Anzahl benötigte Antworten, um ein bestimmtes Vertrauensintervall bei einer Umfrage zu erreichen.

| Erforderliches Vertrauensintervall | Benötigte Anzahl Antworten |
|---|-----------------------------------|
| ±1 Prozentpunkt | 5'400 |
| ± 2 Prozentpunkte | 1'400 |
| ± 3 Prozentpunkte | 600 |
| ± 4 Prozentpunkte | 340 |
| ± 5 Prozentpunkte | 220 |

Lesebeispiel: Um ein 95prozentiges Vertrauensintervall von ± 3 % zu erreichen, braucht es – bei einer Zustimmungsrate von 86 % – mindestens 600 Antworten.

Die Aussagen zu Teilstichproben mit unter 600 Antworten sind deshalb nur mit entsprechenden Anmerkungen zu interpretieren.

4.5 Datenkorrektur

Umfrage-Ergebnisse

Da das Umfragetool auch bei der Schulung des Befragungspersonals eingesetzt wurde, mussten die bei der Schulung erfassten Antworten aus der Datenbank des Umfrageanbieters gelöscht werden. Dies erfolgte entweder über die Zeitstempel oder über die Georeferenzierung. Jeweils ausserhalb der von der Tourenplanung festgelegten Zeiten oder Strecken erfasste Antworten wurden entfernt.

Fahrzeugnummern

Die manuell von den Befragenden erfassten Fahrzeugnummern wurden durch die SBB durch Abgleich mit dem Fahrzeug-Dispositionssystem der SBB verifiziert und die Fahrzeugnummern den jeweiligen Fahrzeugtypen zugeordnet. Etwa 1.5 % der 3'345 Datensätze (ein Datensatz kann mehrere Antworten umfassen) wiesen fehlerhafte Einträge auf. Diese wurden anhand der Einsatzpläne und benachbarter Datensätze manuell korrigiert.

4.6 Standardisieren der Temperaturmessungen

Fahrzeug-Raumlufttemperaturen

Die verwendeten (kalibrierten) Temperaturlogger haben ein leicht verzögertes Ansprechverhalten, wie es aus der Abbildung 6 hervorgeht. Bei diesem Versuch wurden sie am 2. März 2023 (Aussenlufttemperatur 6.7 °C) zweimal ins Büro gezügelt (Raumlufttemperatur 23.3 °C). Daraus geht hervor, dass der Logger rund 140 Sekunden nach einem Temperatursprung (wie zum Beispiel nach dem Einsteigen in den Zug) den «wahren» Temperaturwert um höchstens 0.1 K zu tief anzeigt.

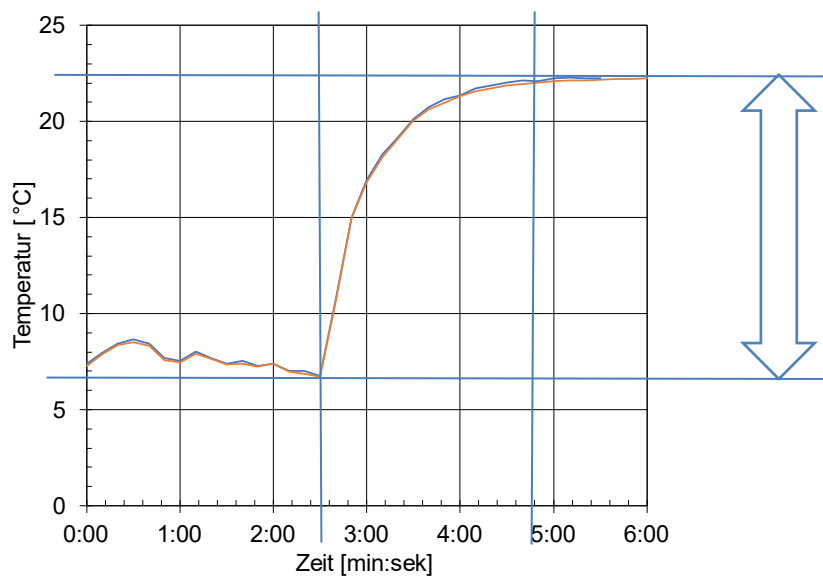


Abbildung 6: Sprungantwort der Temperaturlogger (zwei Versuche): nach 140 Sekunden wird der Endwert erreicht.

Die im Minutentakt aufgezeichneten Temperaturdaten wurden deshalb für die Auswertung wie folgt geglättet:

- Temperaturen unter 12 °C (Metro/Tram unter 8 °C) und über 26 °C wurden verworfen: Diese Messwerte deuten darauf hin, dass der Sensor des Temperaturloggers sich entweder noch nicht an die Raumlufttemperatur angeglichen hat oder aber der Rucksack der Befragenden (während Befragungspausen) zu nah an einer Heizung des Fahrzeugs abgestellt war.
- Den Umfrageantworten wurde ein gleitender 3-Minuten-Mittelwert der gemessenen Temperaturen zugeordnet und auf Zehntel-Grad gerundet. Mit dieser Mittelung wurde versucht sicherzustellen, kurzzeitige Schwankungen innerhalb des Abteils (oder bei Abteilübergängen) aufzufangen.

Witterungsverhältnisse

Die Witterungsverhältnisse (Aussenlufttemperatur, Bewölkungsgrad, Wind) wurden jeweils bei Zugwechsel von den Befragenden über die auf dem Tablet installierte Wetter-App erfasst. Zur Plausibilisierung wurden die 10-min-Messwerte von MeteoSchweiz der nächstgelegenen Wetterstation in ähnlicher Höhe (mit einem Höhenunterschied kleiner als 100 m) beigezogen, mit der Barometerformel höhenkorrigiert und den Datensätzen beigefügt. Dabei zeigte sich, dass die von den Befragern übertragenen Daten aus der Wetter-App die Temperaturbedingungen zum Zeitpunkt der jeweiligen Befragungen ungenügend wiedergaben. Im Datensatz werden daher als Aussenlufttemperatur die Daten von MeteoSchweiz verwendet.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert und erläutert, jeweils unterteilt nach Fernverkehr, Regionalverkehr und Ortsverkehr. Zusätzlich wurde der Einfluss auf die Reisedauer ausgewertet. Weitere Einflussfaktoren wie Luftbewegung, Aussenlufttemperatur, Witterung oder Position im Wagen sind nicht Gegenstand dieser Studie.

5.1 Thermische Behaglichkeit im Fernverkehr

Im Fernverkehr wurden 13'126 Antworten gesammelt. Die Anzahl Antworten verteilen sich auf die gemessenen, auf ganze Grad gerundeten Raumlufthtemperaturen gemäss Abbildung 7. Am häufigsten wurde eine Raumlufthtemperatur von 22 °C gemessen. Damit zeigt sich, dass im Fernverkehr das ursprüngliche Ziel, die Raumlufthtemperatur auf 20 °C abzusenken nur bei einer kleinen Anzahl von Messungen nachgewiesen werden konnte. Die meisten Züge verkehrten weiterhin mit Raumlufthtemperaturen von 21 bis 22 °C, was annähernd dem Temperatursollwert unter Normalbedingungen der SBB-Fahrzeuge von 22 °C im Heizbetrieb liegt. Zusätzlich trägt die Regeltoleranz der HLK-Anlagen zur Streuung der Raumlufthtemperatur bei. Die tatsächliche Regeltoleranz der HLK-Anlagen in Zügen beträgt üblicherweise zwischen ± 1 K und ± 2 K auf den eingestellten Sollwert.

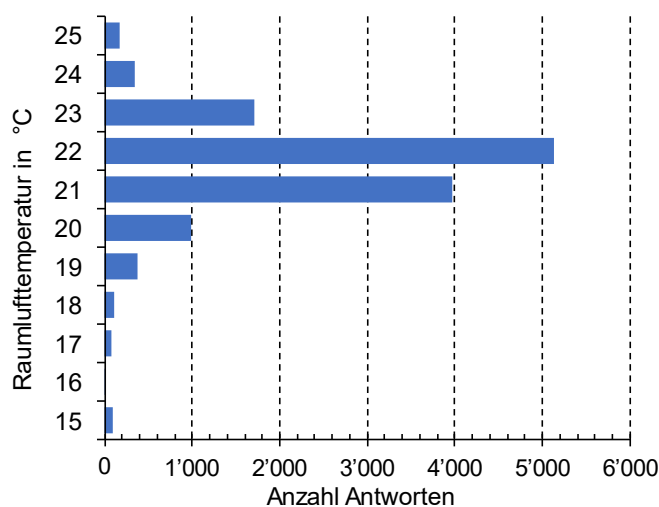


Abbildung 7: Anzahl Antworten im Fernverkehr nach Raumlufthtemperaturniveau.

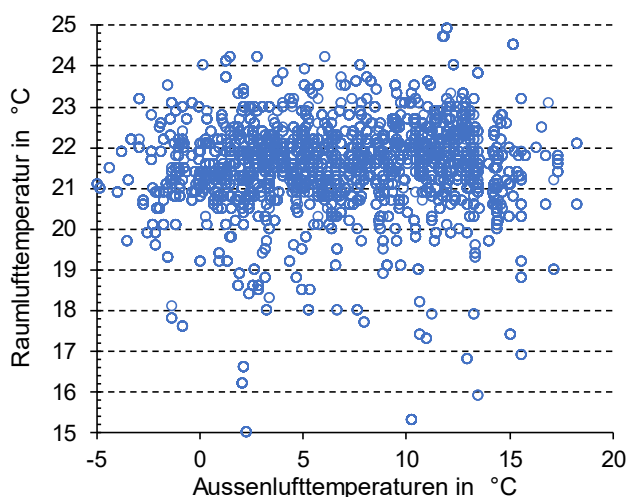


Abbildung 8: Abhängigkeit der gemessenen Raumlufthtemperaturen von der Aussenlufttemperatur im Fernverkehr.

Abbildung 8 zeigt, bei welchen von MeteoSchweiz ermittelten Aussenlufttemperaturen (siehe obiges Kapitel 4.6) welche Raumlufthtemperaturen gemessen wurden. Die Häufung der Messpunkte entlang der Linie 22 °C Raumlufthtemperatur weist darauf hin, dass die Aussenlufttemperatur in diesem Temperaturbereich keinen Einfluss auf die Raumlufthtemperatur hat. Die HLK-Anlagen regeln auf konstante Raumlufthtemperatur. Die geringe Anzahl der Antworten, welche bei Raumlufthtemperaturen von 19 °C und darunter sowie bei 24 °C und darüber gesammelt wurden, weisen eine geringe statistische Verlässlichkeit auf (siehe Kapitel

4.4). Deshalb wurden sie für die nachfolgenden Analysen weggelassen. So verblieben 11'800 Antworten für die vertiefte Analyse «Fernverkehr».

Die Aufteilung der Antworten auf die drei Zufriedenheitsstufen «zu kalt» - «angenehm» - «zu warm» ist in der nachfolgenden Abbildung 9 ersichtlich.

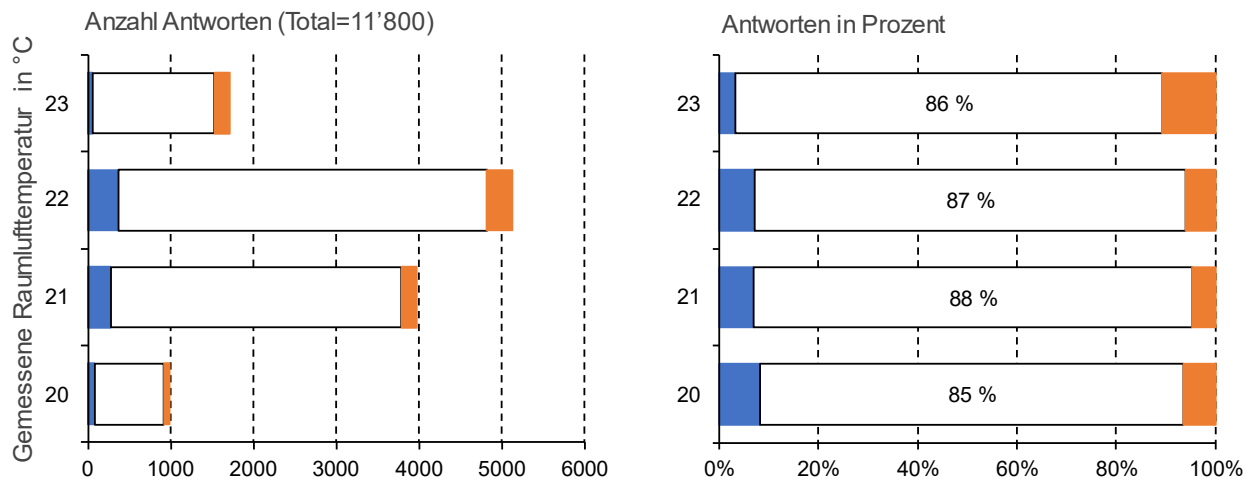


Abbildung 9: Zufriedenheitswerte im Fernverkehr nach Raumlufttemperaturniveau (blau: «zu kalt», weiss: «angenehm», orange: «zu warm»).

Der Anteil Antworten «angenehm» beträgt im **Fernverkehr** zwischen 20 °C und 23 °C Raumlufttemperatur 85 % oder mehr. Der Anteil Antworten «zu kalt» nimmt erwartungsgemäss mit steigenden Raumlufttemperaturen ab (von 8.3 % bei 20 °C auf 3.4 % bei 23 °C), während der Anteil der Antworten «zu warm» zunimmt (von 6.4 % bei 18 °C auf 10.8 % bei 23 °C). Die Vertrauensintervalle für den Anteil Antworten «angenehm» sind in untenstehender Tabelle 3 zusammengetragen. Dies bedeutet beispielsweise, dass mit 95prozentiger Wahrscheinlichkeit 87.4 % bis 89.4 % **aller** Fahrgäste im Fernverkehr eine Raumlufttemperatur von 21 °C «angenehm» empfinden.

Tabelle 3: Vertrauensintervalle für den Anteil Antworten «angenehm» im Fernverkehr.

| Temperaturniveau | Anzahl Antworten | 95%-Vertrauensintervall |
|------------------|------------------|-------------------------|
| 23 °C | 1'714 | 85.8 ± 1.7 % |
| 22 °C | 5'131 | 86.7 ± 0.9 % |
| 21 °C | 3'970 | 88.4 ± 1.0 % |
| 20 °C | 982 | 85.3 ± 2.2 % |

Einfluss der Aufenthaltsdauer im Fernverkehr

Für die Auswertung der Fahrgastzufriedenheit im FV in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer werden die Antworten je Temperaturniveau auf die jeweils genannte Aufenthaltsdauer aufgeteilt. Es verbleiben auf gewissen dargestellten Teilstichproben eine geringe Anzahl Antworten; bei denjenigen, deren Vertrauensintervall ± 4 % übersteigt, wurde dies mit einer Fussnote vermerkt.

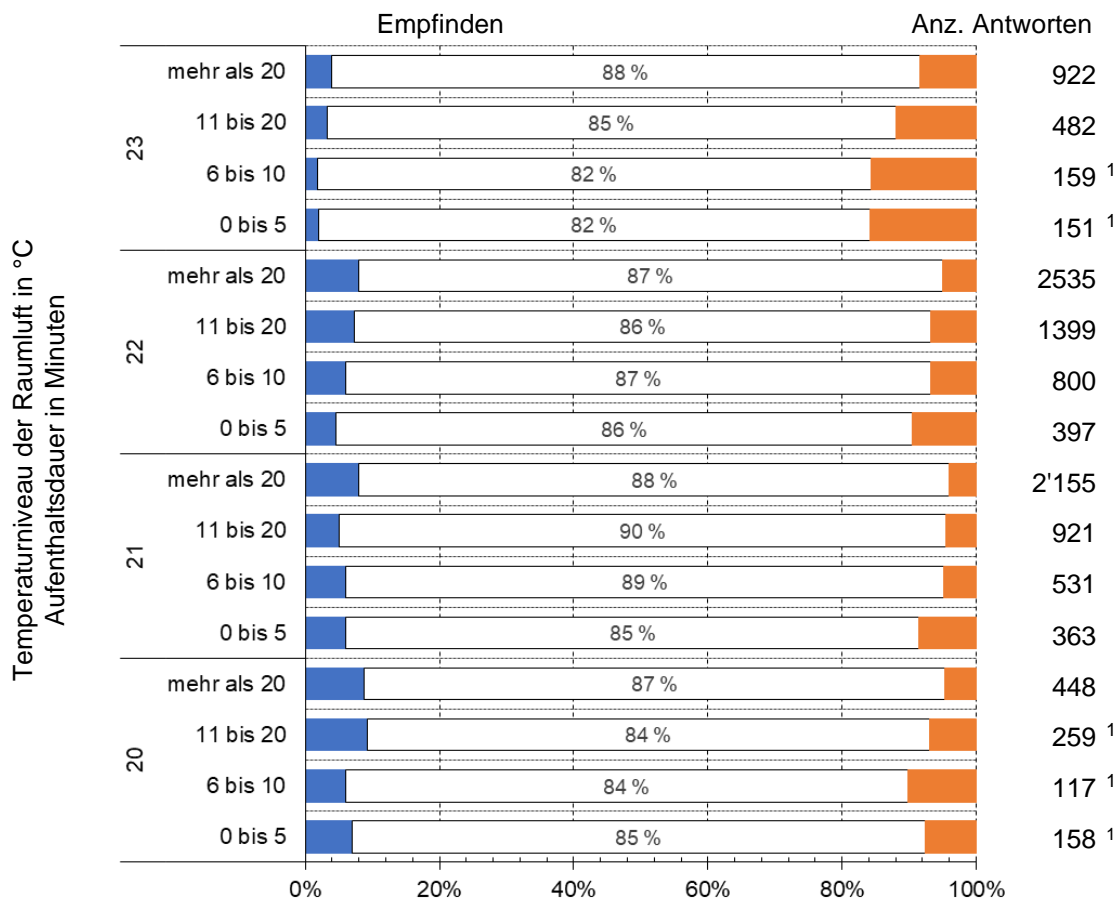


Abbildung 10: Fahrgastzufriedenheit nach Aufenthaltsdauer je Raumlufttemperaturniveau im Fernverkehr in prozentualen Anteilen: blau - «zu kalt», weiss - «angenehm», orange - «zu warm» sowie absolute Anzahl Antworten.

Aufgrund der grösseren Haltestellenabstände im Fernverkehr ist die mittlere Reisedauer der Fahrgäste grösser als im Regionalverkehr.

Ergänzend zur vorangehenden Analyse zeigt sich hier, dass die Reisedauer einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Temperatur hat. Der Anteil Personen, die «zu warm» haben nimmt ab, je länger sich eine Person im Zug aufhält. Bei den Personen die «zu kalt» haben, verhält es sich gerade umgekehrt. Deutlich erkennbar ist, dass bei 23 °C Raumtemperatur der Anteil Personen die «zu warm» haben grösser ist wie der Anteil Personen, die «zu kalt» haben.

Insgesamt unterscheiden sich die Temperaturbereiche 20 °C bis 22 °C in der Wahrnehmung der Fahrgäste kaum. Bei 21 °C Raumtemperatur sind die Zufriedenheitswerte am höchsten und der Anteil unzufriedener Fahrgäste ist ausgeglichen zwischen «zu warm» und «zu kalt».

Andere Einflussfaktoren (Klasse, Fahrzeugtyp, allenfalls Deck [oben, unten, Mitte], Witterung)

Diese Einflussfaktoren wurden erhoben, werden aber in dieser Untersuchung nicht systematisch ausgewertet. Sie stehen den beteiligten Unternehmen und anderen Interessierten zur weiteren Analyse zur Verfügung («Daten für weitere Forschung», vgl. Anhang, Kapitel 9.3).

¹ Anteil «angenehm» mit geringerer statistischer Verlässlichkeit, da das Vertrauensintervall $\pm 4\%$ überschreitet.

5.2 Thermische Behaglichkeit im Regionalverkehr

Im Regionalverkehr wurden 14'800 Antworten gesammelt. Die Anzahl Antworten verteilt sich auf die gemessenen, auf ganze Grad gerundete Raumlufttemperaturen gemäss Abbildung 11.

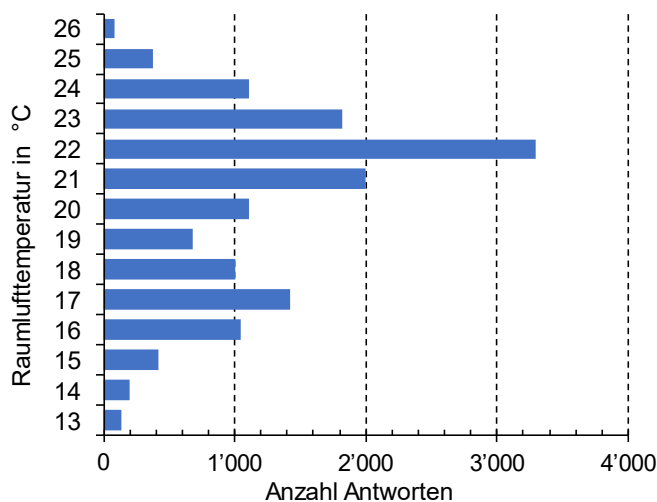


Abbildung 11: Anzahl Antworten im Regionalverkehr nach Raumlufttemperaturniveau.

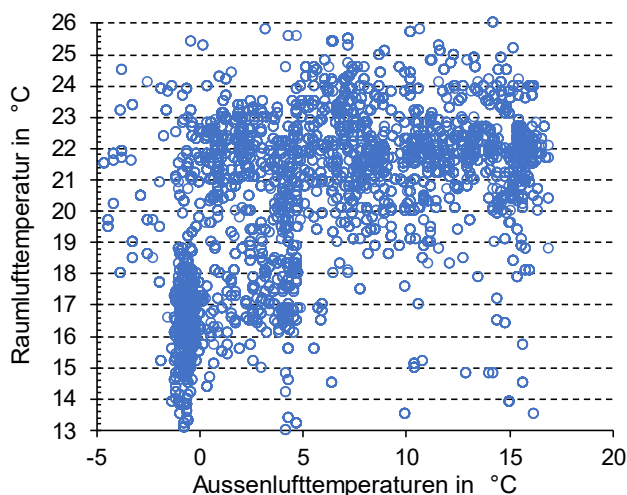


Abbildung 12: Abhängigkeit der gemessenen Raumlufttemperaturen von der Aussenlufttemperatur im Regionalverkehr

Es fällt auf, dass die Verteilung der gemessenen Temperaturen zwei relative Maxima bei 17 °C und 22 °C aufweist. Damit zeigt sich, dass im Regionalverkehr das ursprüngliche Ziel, die Raumlufttemperatur abzusenken nur bei einem Teil der Messungen nachgewiesen werden konnte. Viele Fahrzeuge verkehren also weiterhin mit Raumlufttemperaturen von 22 °C, was dem Temperatursollwert unter Normalbedingungen der SBB-Fahrzeuge im Heizbetrieb entspricht. Die Häufung bei 17 °C lässt sich mehrheitlich auf Fahrzeuge der RBS zurückführen. Abbildung 12 zeigt die gemessenen Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur. Eine Häufung der Messwerte entlang der Linie 22 °C Raumlufttemperatur weist auf konstante Regelung ohne Abhängigkeit zur Aussenlufttemperatur hin. Eine weitere Häufung ist bei -1 °C Aussenlufttemperatur zu beobachten, diese Daten wurden an einem Tag bei der RBS erhoben.

Zusätzlich trägt die Regeltoleranz der HLK-Anlagen zur Streuung der Raumlufttemperatur bei. Die tatsächliche Regeltoleranz der HLK-Anlagen in Zügen beträgt üblicherweise zwischen ± 1 K und ± 2 K auf den eingestellten Sollwert.

Für die nachfolgenden Analysen wurden die wenigen Antworten, die bei Raumlufttemperaturen von 15 °C und weniger oder bei 25 °C und mehr erhoben wurden, wegen der begrenzten Aussagekraft weggelassen (das Vertrauensintervall beträgt mindestens ± 5 Prozentpunkte; siehe Kapitel 4.4). So verblieben 13'500 Antworten für die vertiefte Analyse «Regionalverkehr».

Die Aufteilung der Antworten auf die drei Zufriedenheitsstufen «zu kalt» - «angenehm» - «zu warm» ist in der nachfolgenden Abbildung 13 ersichtlich.

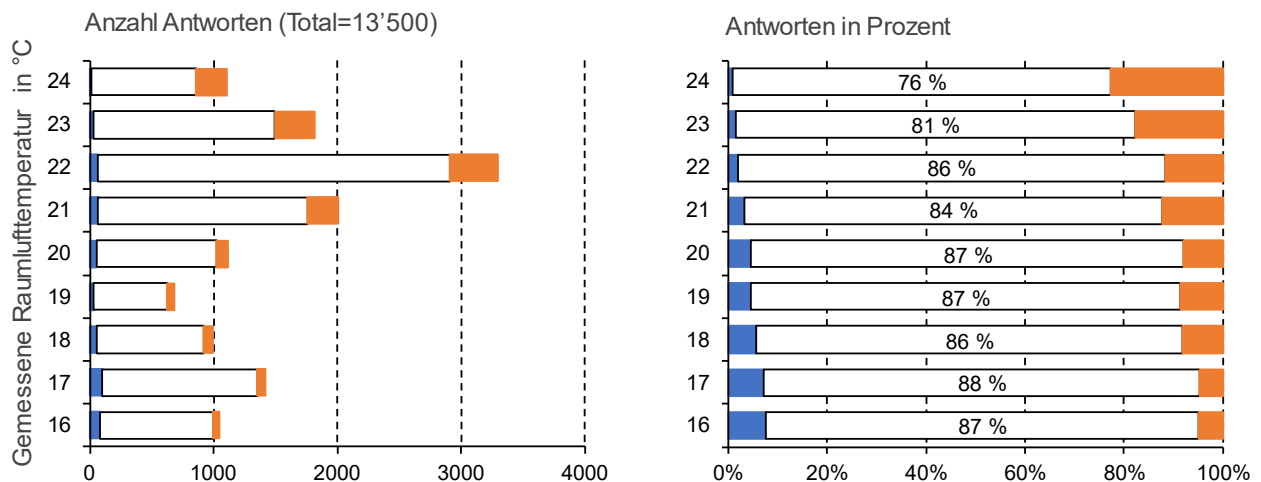


Abbildung 13: Zufriedenheitswerte im Regionalverkehr nach Raumlufttemperatur (blau: «zu kalt», weiss: «angenehm», orange: «zu warm»)

Die Zufriedenheitsrate «angenehm» beträgt zwischen 16 °C und 22 °C immer 84 % und mehr. Die Rate der Unzufriedenen «zu kalt» nimmt erwartungsgemäss mit steigenden Temperaturen ab (von knapp 7.6 % bei 16°C auf 1.9 % bei 22 °C), während diejenige der Unzufriedenen «zu warm» zunimmt (von 5 % bei 18 °C auf knapp 12 % bei 24 °C). Insgesamt unterscheidet sich im Temperaturbereich von 18 °C bis 20 °C die Wahrnehmung der Fahrgäste nur wenig. Es sind die Zufriedenheitswerte hoch und der Anteil unzufriedener Fahrgäste ist ausgeglichen zwischen «zu warm» und «zu kalt».

Die Vertrauensintervalle für den Anteil Antworten «angenehm» sind in untenstehender Tabelle 4 zusammengetragen. Dies bedeutet beispielsweise, dass mit 95prozentiger Wahrscheinlichkeit 84.3 % bis 89.3 % aller Fahrgäste im Regionalverkehr eine Raumlufttemperatur von 19 °C «angenehm» empfinden.

Tabelle 4: Vertrauensintervalle für den Anteil Antworten «angenehm» im Regionalverkehr.

| Temperaturniveau | Anzahl Antworten | Vertrauensintervall |
|------------------|------------------|---------------------|
| 24 °C | 1'109 | 76.5 ± 2.5 % |
| 23 °C | 1'820 | 80.7 ± 1.8 % |
| 22 °C | 3'295 | 86.3 ± 1.2 % |
| 21 °C | 2'003 | 84.5 ± 1.6 % |
| 20 °C | 1'113 | 87.4 ± 1.9 % |
| 19 °C | 684 | 86.8 ± 2.5 % |
| 18 °C | 999 | 86.2 ± 2.1 % |
| 17 °C | 1'418 | 88.2 ± 1.7 % |
| 16 °C | 1'050 | 87.4 ± 2.0% |

Einfluss der Aufenthaltsdauer im Regionalverkehr.

Für die Auswertung der Fahrgastzufriedenheit im Regionalverkehr in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer werden die Antworten je Temperaturniveau auf die jeweils genannte Aufenthaltsdauer aufgeteilt. Es verbleiben auf gewissen dargestellten Temperatur-Aufenthaltsdauer-Niveaus eine geringe Anzahl Antworten; bei denjenigen, deren Vertrauensintervall ± 4 % übersteigt, wurde dies mit einer Fussnote vermerkt. Deshalb kann es zu Ausreissern der Daten kommen (beispielsweise bei 16 °C und einer Aufenthaltsdauer länger als 11 Minuten).

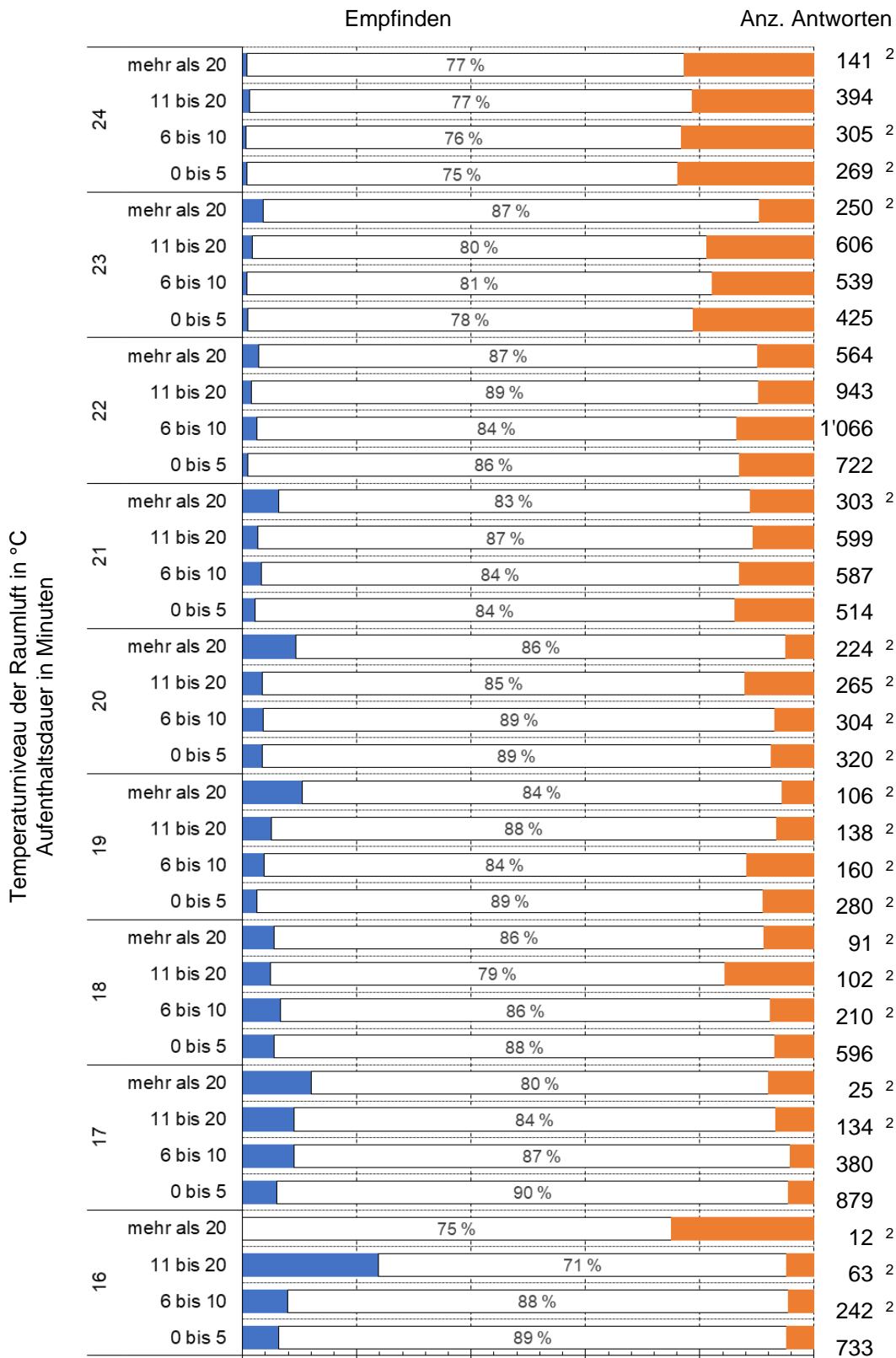


Abbildung 14: Fahrgastzufriedenheit nach Aufenthaltsdauer je Raumlufttemperaturniveau im **Regionalverkehr** in prozentualen Anteilen: blau - «zu kalt», weiss - «angenehm», orange - «zu warm», sowie absolute Anzahl Antworten.

Aufgrund der geringeren Haltestellenabstände im Regionalverkehr ist die mittlere Reisedauer der Fahrgäste kürzer als im Fernverkehr. In die Kategorie Regionalverkehr fallen in dieser Untersuchung Fahrzeuge

² Anteil «angenehm» mit geringerer statistischer Verlässlichkeit, da das Vertrauensintervall $\pm 4\%$ überschreitet.

mit recht unterschiedlichem Einsatzprofil. So ist die mittlere Reisedauer in der S-Bahn Bern (RBS «Worbla») etwa 10 Minuten, während sie auf den Regio-Dosto oder FLIRT-Triebzügen der SBB am Genfersee durchaus 30 Minuten betragen kann. Entsprechend sind mögliche Sollwertanpassungen auf das Einsatzprofil der jeweiligen Fahrzeugflotte abzustimmen.

Weniger deutlich wie die Analyse im Fernverkehr zeigt sich hier, dass die Reisedauer einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Temperatur hat. Der Anteil Personen, die «zu warm» haben nimmt tendenziell ab, je länger sich eine Person im Zug aufhält. Bei den Personen die «zu kalt» haben, verhält es sich gerade umgekehrt. Deutlich erkennbar ist, dass bereits ab 21 °C Raumtemperatur der Anteil Personen die «zu warm» haben grösser ist wie der Anteil Personen, die «zu kalt» haben.

5.3 Thermische Behaglichkeit im Ortsverkehr

Der Ortsverkehr zeichnet sich dadurch aus, dass die Reisezeiten üblicherweise kurz und die Türöffnungen häufig sind, da die Haltestellen nah beieinander liegen. Bei den TU im Ortsverkehr wurden während vier (BVB) respektive zwei (tl) Tagen Befragungen durchgeführt, so kamen 1'443 Antworten zusammen. Deren Verteilung auf die gemessenen Raumlufttemperaturen ist in der Abbildung 15 ersichtlich.

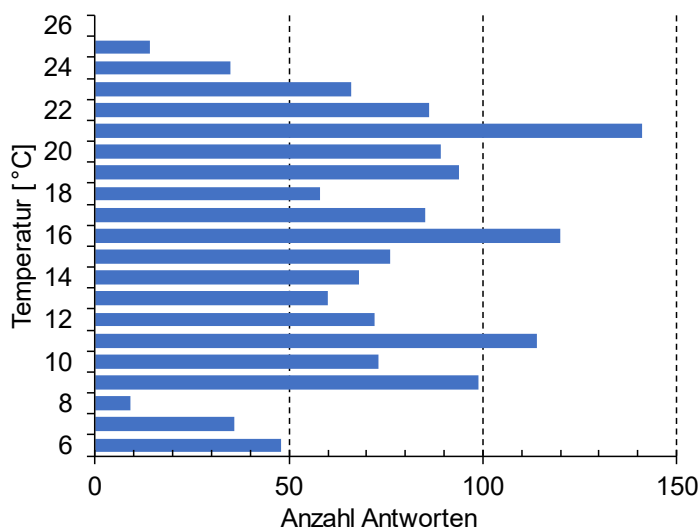


Abbildung 15: Anzahl Antworten im Ortsverkehr nach Raumlufttemperaturniveau.

Diese geringe Anzahl je Temperaturniveau lässt keine statistisch verlässliche Auswertung der Zufriedenheit der Fahrgäste nach verschiedenen Raumlufttemperaturniveaus zu (das Vertrauensintervall für die Antworten «angenehm» liegt bei allen Teilstichproben bei über ± 6.6 Prozentpunkten), weshalb hier auf eine detaillierte Auswertung verzichtet werden muss. Daher wird auf die Auswertung des Regionalverkehrs bei Aufenthaltsdauer der Fahrgäste bis 10 Minuten verwiesen.

Mit der kurzen Aufenthaltsdauer bis 10 Minuten ist die Zufriedenheit der Fahrgäste zwischen 16 °C und 20 °C hoch. Bereits ab 19 °C wird bei dieser Aufenthaltsdauer der Anteil Personen, die «zu warm» haben grösser als der Anteil Personen, die «zu kalt» empfinden. Damit wird unter Berücksichtigung der Energieeffizienz 16 °C als Sollwert der Raumtemperatur für den Ortsverkehr empfohlen.

6 Energieeinsparungen aufgrund von Temperaturabsenkungen

In diesem Kapitel wird eine grobe Schätzung des Energiesparpotenzials hergeleitet, basierend auf effektiven Messungen und dem Mengengerüst des schienengebundenen öffentlichen Verkehrs in der Schweiz, inklusive den elektrisch betriebenen Trolleybussen. Nicht berücksichtigt sind hingegen die mit Diesel betriebenen Busse sowie Seilbahnen.

6.1 Beispiel DTZ-Triebzug der SBB (RABe 514)

Die SBB hat auf Grund der Resultate einer früheren Untersuchung [1] entschieden, die Flotte der DTZ-Triebzüge (RABe 514) mit einer neuen Raumtemperatur-Regelung auszurüsten: Die Raumlufttemperatur wird von 22 °C auf 20 °C gesenkt.

Prognostizierte Energieeinsparung mit Modell

Die Energiesparwirkung der Raumlufttemperaturanpassung wurde durch die SBB mit einem mathematischen Modell abgeschätzt, welches die energetischen Verluste durch Transmissionswärmeverluste (Ableitung von Wärme über den Wagenkasten) und Lüftungswärmeverluste berücksichtigt [15]. Das Modell berechnet die energetische Einsparung für diskrete Aussenlufttemperaturniveaus, welche dann wiederum mit der Häufigkeit dieser Temperaturen pro Jahr zu einer Jahreseinsparung kombiniert werden. Dieses Grundmodell wurde durch Messungen in der Klimakammer Olten validiert.

Zeitlicher Ablauf der Umstellung

Die neue Raumlufttemperatur-Sollwertregelung wurde mittels Messungen eines Prototyp-Fahrzeugs im realen Betrieb überprüft. Das Fahrzeug wurde mit Referenz-Temperaturloggern ausgerüstet, zusätzlich wurden die fahrzeugeigenen Messwerte der HLK-Anlagen aufgezeichnet. Diese Überprüfung ergab, dass die vorgesehenen Sollwerte eingehalten werden.

Im Herbst 2022 erfolgte schliesslich der Softwarerollout auf die ganze Flotte der DTZ-Triebzüge. Die Verifizierung der prognostizierten Energieeinsparung wurde mit den in den Fahrzeugen verbauten Messgeräten zur Bahnstromverrechnung vorgenommen.



Abbildung 16: DTZ-Triebzug der Zürcher S-Bahn (RABe 514) Links: Aussenansicht, rechts Energiemessgerät zur Verrechnung des Bahnstroms (Quelle: SBB).

Neue Regelung der Raumtemperatur

Gegenüber der bisherigen Sollwertregelung, welche die Raumlufttemperatur auf minimal 22 °C regelt, kann die neue Regelung in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur die Raumlufttemperatur bis auf 20 °C absenken (Abbildung 17). Dabei wird ein neuer Übergangs- oder «Hysteresebereich» für den Sollwert zwischen 0 °C und 19 °C Aussenlufttemperatur eingeführt. Im Heizbetrieb (Winter) gilt nun ein Sollwert der Raumlufttemperatur von 20 °C bei Aussenlufttemperaturen bis 10 °C. Im Kühlbetrieb (Sommer) hingegen gilt ein Raumlufttemperatur-Sollwert von 22 °C bei Aussenlufttemperaturen von 5 °C bis 19 °C. Wie bei der bisherigen Sollwertkennlinie schon umgesetzt, steigt der Sollwert für die Raumlufttemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur an.

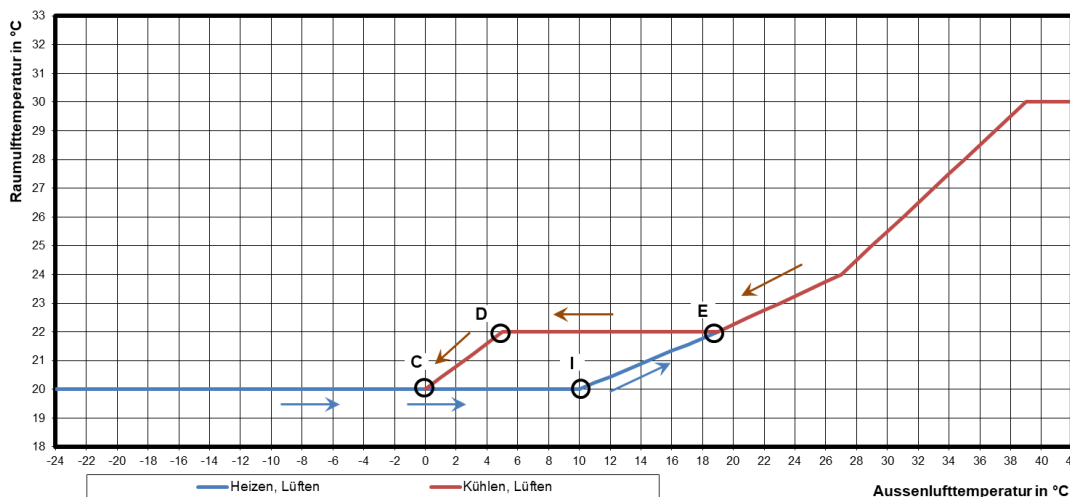


Abbildung 17: Neue Raumlufttemperatur-Sollwertkennlinie für die Fahrgasträume der DTZ-Triebzüge. Je nach Betriebsart (Heizbetrieb, blaue Linie; Kühlbetrieb, rote Linie) wird in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur eine andere Raumlufttemperatur eingeregelt.

Analyse des Energieverbrauchs

Um die effektive Energieeinsparung der Umsetzung zu ermitteln, wurde der gesamte Energieverbrauch aller Fahrzeuge der DTZ-Flotte innerhalb von zwei Zeiträumen verglichen. Als Referenz diente der Zeitraum Januar bis Mai 2022, hier waren die Fahrzeuge der DTZ-Flotte noch mit der bisherigen Raumlufttemperatur-Sollwertregelung ausgerüstet. Im Vergleichszeitraum Januar bis Mai 2023 war die Umrüstung der Flotte abgeschlossen und die neue Regelung aktiv.

Als Datenquelle dienen die Energiemessgeräte der Triebzüge, die auch für die Verrechnung der Energiekosten für kommerzielle Fahrten verwendet werden. Es wurden nur Energieverbräuche während kommerziellen Fahrten ausgewertet, also keine Verbräuche abgestellter Züge oder durch Rangierfahrten. Je gefahrener Strecke wurde für jede Tagesstunde aus dem Energieverbrauch die mittlere Leistung berechnet und der jeweiligen Aussenlufttemperatur zugeordnet.

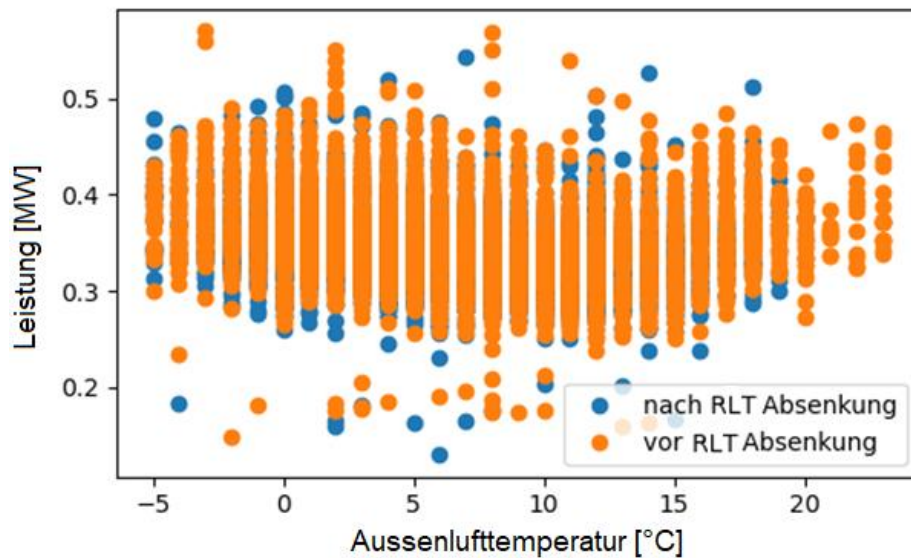


Abbildung 18: Der Leistungsbezug in MW jeder Tagesstunde aller Fahrzeuge DTZ wird der jeweiligen Aussenlufttemperatur zugeordnet (Strecke Zürich Flughafen nach Herrliberg-Feldmeilen).

Die Aussenlufttemperatur wurde über Datum und Position den Energiedaten zugeordnet, als Datenquelle dienen die Messwerte einer SBB eigenen Meteodatenbank. Anschliessend wurde der Leistungsbezug je Temperaturintervall gemittelt, bereits hier konnte qualitativ ein Einspareffekt abgelesen werden (siehe Abbildung 19).

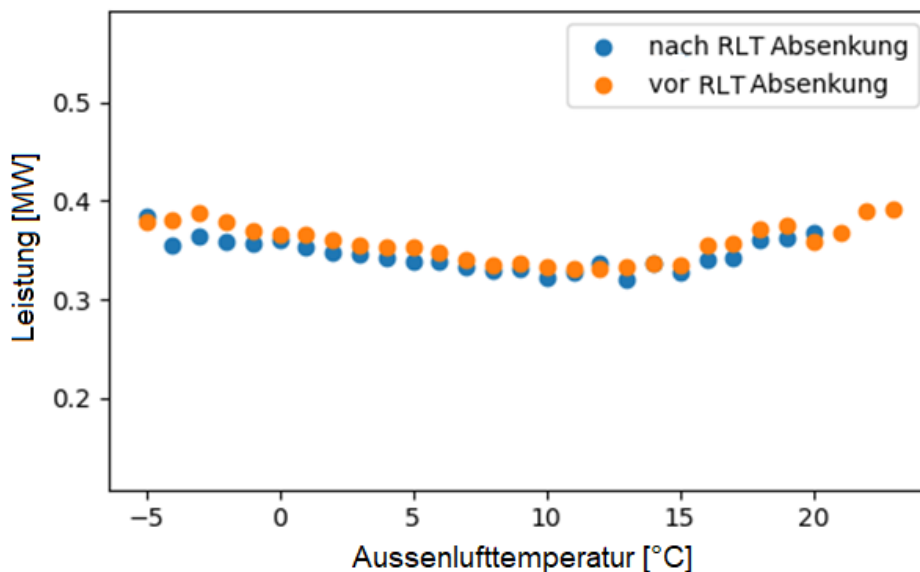


Abbildung 19: Der Leistungsbezug in MW jeder Tagesstunde aller Fahrzeuge DTZ wird für das jeweilige Aussenluft-Temperaturniveau gemittelt. Blaue Punkte für den Zeitraum nach der Optimierung, orange Punkte für den Ausgangszustand (Strecke Zürich Flughafen nach Herrliberg-Feldmeilen).

In einem letzten Schritt wurde die Differenz zwischen dem Leistungsbezug vor und nach der Optimierung pro Temperaturintervall berechnet. Dies entspricht der eingesparten Leistung in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur (siehe Abbildung 20).

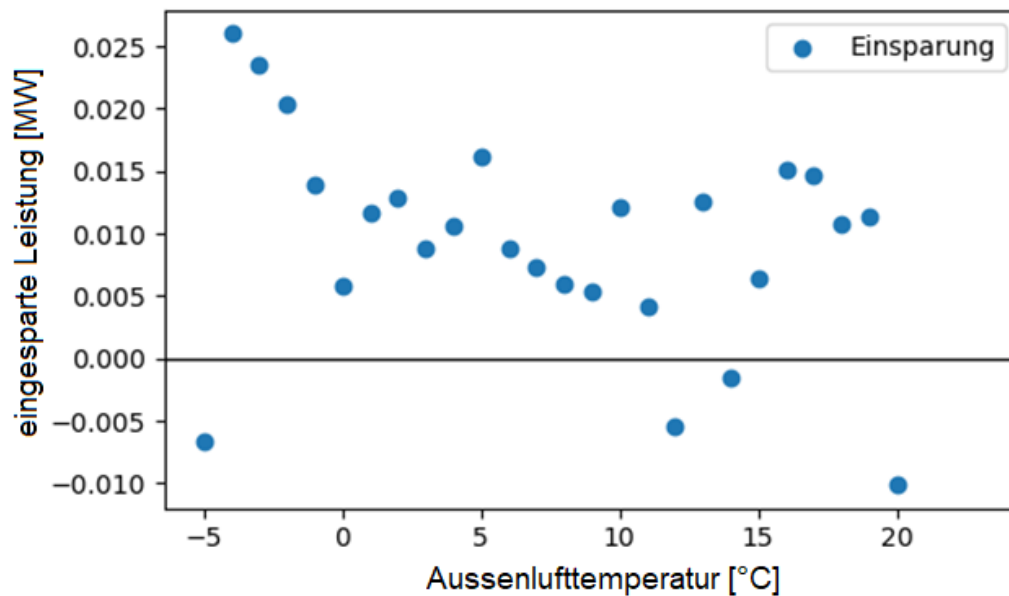


Abbildung 20: Differenz zwischen dem Verbrauch vor und nach der Optimierung pro Aussenluft-Temperaturintervall. Dies entspricht der eingesparten Leistung in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur (Strecke Zürich Flughafen nach Herrliberg-Feldmeilen).

Einsparung pro Fahrzeug

Die jährliche Energieeinsparung wurde auf Grundlage der im Jahr 2022 kommerziell gefahrenen Trassen abgeschätzt. Jeder gefahrenen Trasse wurde ein Wert der Energieeinsparung zugeordnet, der auf der Fahrdauer, der Aussenlufttemperatur während der Fahrt und der ermittelten temperaturabhängigen Leistungseinsparungen basiert. Die Summe dieser so berechneten Energieeinsparung über alle Trassen entspricht der jährlichen Energieeinsparung der DTZ-Fahrzeugflotte. Diese beträgt gemäss der hier erläuterten Methodik und der getroffenen Annahmen 960 MWh/Jahr; finanziell entspricht dies Energieminderkosten im Umfang von jährlich gut 100'000 CHF für die gesamte Flotte von 61 Fahrzeugen³. Verglichen mit dem Gesamtenergiebedarf der Flotte von rund 60-70 GWh pro Jahr entspricht dies einer Reduktion zwischen 1.4 % und 1.6 %. Bezogen auf einen Wagenkasten des Triebzugs ergibt sich eine Einsparung von 4 MWh / Jahr.

Übereinstimmung Modellierung und gemessene Einsparung

Die Auswertung des Energieverbrauchs nach Umsetzung der Raumlufttemperatur-Absenkung zeigt etwas tiefere Werte (960 MWh/a Einsparung) als das Modell (1'340 MWh/a) erwarten liess. Mögliche Gründe für diese Abweichung könnte das fahrzeugspezifische Verhalten sein.

So ist entscheidend, dass die HLK-Anlage beim Aufstarten immer auf den energetisch günstigeren Raumlufttemperatur-Sollwert einregelt. Dies konnte bei der Überprüfung der DTZ-Flotte nicht vollständig nachgewiesen werden. Andererseits hat die Steuerung des Aussenluftanteils in Abhängigkeit der Anzahl Fahrgäste im Fahrzeug einen grossen Einfluss auf den Energieverbrauch. Hier wurde im Modell mit einer inaktiven Regelung gerechnet (immer 100% Besetzungsgrad der Wagen). Tatsächlich verfügt die DTZ-Flotte aber über eine eingeschränkte Regelung des Aussenluftanteils. Dadurch wird das Energiesparpotenzial überschätzt.

³ Als Basis dient der Strompreis von 0.12 CHF/kWh Bahnstrom im Jahr 2023 gemäss dem Leistungskatalog Infrastruktur SBB.

6.2 Beispiel Cobra-Tram der vbz (Be 5/6)

Die vbz (Verkehrsbetriebe Zürich) hatten in einem ESöV-Projekt drei verschiedene Gruppen von Trams mit drei unterschiedlichen Sollwerten der Raumlufthtemperaturregelung konfiguriert und den Energiebedarf sowohl modelliert wie auch gemessen. Alle nachfolgenden Informationen stammen aus dem Schlussbericht des Projektes [2].



Abbildung 21: Cobra-Tram der vbz (Be 5/6), Links: Aussenansicht (Quelle: wikipedia.org), rechts Strommessung in der Tram-Leittechnik (Bild: vbz.ch)

Prognostizierte Energieeinsparung mit Modell

In einer Masterarbeit [16] wurde eine Einsparung von insgesamt 660 MWh/Jahr pro K Temperaturreduktion modelliert, für eine Absenkung von 2 K also 1'320 MWh/Jahr. Als Basis der Modellierung dienten auch hier die effektiven Wärmeflüsse durch die Aussenhülle des Fahrzeuges und die Verluste über die Lüftung.

Neue Regelung der Raumtemperatur

Im Projekt wurden drei Gruppen von vbz Cobra-Trams mit drei unterschiedlichen Sollwerten der Raumlufthtemperaturregelung konfiguriert (Sollwerte im Heizbetrieb 20 °C, 18 °C, 16 °C und dazugehörige Kühlstufen, siehe Abbildung 22).

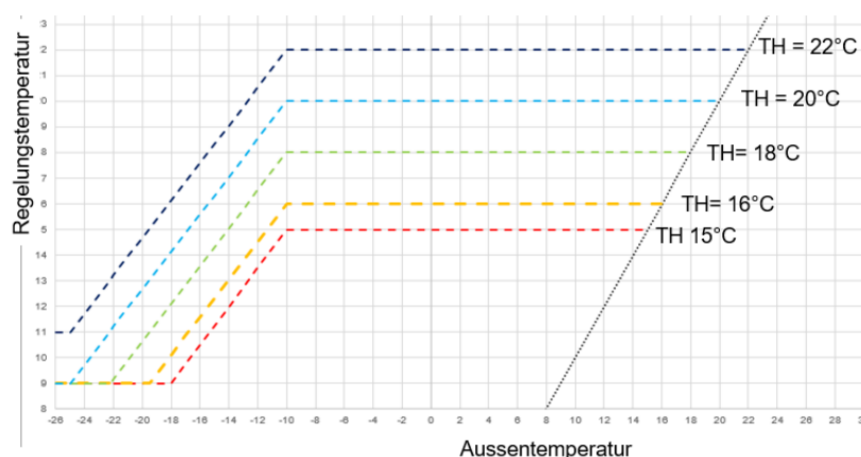


Abbildung 22: Sollwerte der Raumlufthtemperaturregelung der Cobra-Trams in Abhängigkeit der Aussentemperatur

Der Temperatursollwert Heizung (TH) wird zur Regelung der Fahrzeugheizung verwendet: Wenn der Fahrgeastraum wärmer ist als die Aussentemperatur, wird die Heizung ausgeschaltet. In Abhängigkeit der

Aussenlufttemperatur wird auf den eingestellten Sollwert geheizt. Ausnahme: Unterhalb von -10 °C Aussenlufttemperatur wird der Sollwert TH linear zur Aussenlufttemperatur reduziert, jedoch immer auf mindestens 9 °C gehalten.

Analyse des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch für Heizung (direkte Messung) und Kühlung (indirekte Messung) wurde während des Zeitraums Februar 2021 bis März 2022 für die drei Versuchsgruppen direkt miteinander verglichen: Die Fahrzeugsteuerungssoftware berechnet aus der Netzspannung und den eingeschalteten Widerstandselementen den effektiven Energiebedarf der Heizung, zusätzlich wird die gesamte Energie des Hilfsbetriebeumrichters erfasst.

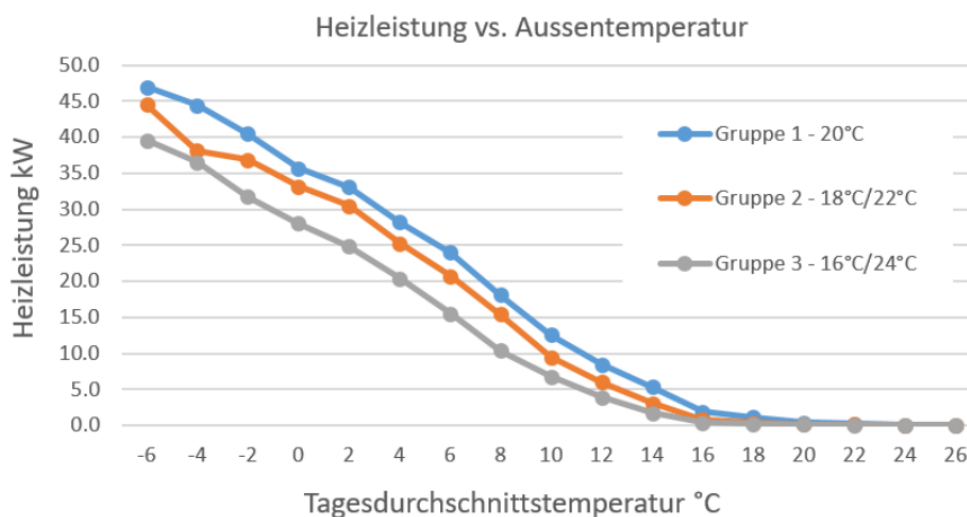


Abbildung 23: Gemessene Heizleistung der drei Gruppen in Abhängigkeit der Tagesdurchschnittstemperatur.

Einsparung pro Fahrzeug

Durch den Versuchsbetrieb konnte nachgewiesen werden, dass mit einer Senkung der Raumlufttemperatur von 18 °C auf 16 °C (2 K Differenz) elektrische Energie von etwa 1.3 GWh/Jahr für die gesamte Zürcher Cobra Tramflotte (88 Fahrzeuge) eingespart wird. Umgerechnet auf ein Fahrzeug von 36 m Länge entspricht dies einer Einsparung von 14.7 MWh/Jahr.

Übereinstimmung Modellierung und gemessene Einsparung

Die effektiven Messungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem in [16] entwickelten Modell (1'320 MWh/Jahr) und effektiv gemessener Einsparung (1'300 MWh/Jahr bei Reduktion von 18 °C auf 16 °C , resp. 1'000 MWh/Jahr bei Reduktion von 20 °C auf 18 °C).

6.3 Gesamtpotenzial Energieeinsparung

Mit den Angaben aus den beiden vorangegangenen Kapiteln wird nun eine erste Abschätzung des Gesamtpotenzials für den schienengebundenen öffentlichen Verkehr und die Trolleybusse für eine Absenkung der Temperatur im Fahrgastraum vorgenommen. Das Mengengerüst wird der Statistik des öffentlichen Verkehrs [17] entnommen. Die eigentliche Herleitung des Gesamtpotenzials ist in der untenstehenden Tabelle aufgeführt, dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Der **Energiebedarf** des öffentlichen schienengebundenen Personenverkehrs (inklusive Trolleybusse) beträgt insgesamt rund 2'200 GWh/Jahr [18].
- Die **Anzahl Fahrzeuge** wird der Statistik des öffentlichen Verkehrs entnommen. Als eigentliche Messgrösse im Eisenbahnverkehr dient die Einheit Wagenkasten, d.h. derjenige Teil eines Zuges,

welcher starr zwischen zwei Drehgestellen ist. So weist beispielsweise ein vierteiliger FLIRT-Triebzug vier Wagenkästen auf. Die Fahrzeuge werden zwischen Fernverkehr und Regionalverkehr aufgeteilt.

- Folgende Annahmen werden bezüglich der **Temperaturabsenkung** getroffen:
 - Im **Fernverkehr** wird die Temperatur von 22 °C auf 21 °C gesenkt. Dies betrifft rund 1'900 Wagenkästen. Da keine detaillierten Daten zum Energieverbrauch der HLK-Anlagen der Wagen vorliegen, wird als Mittelwert für die Fernverkehrsfahrzeuge 2.5 MWh/Jahr je Wagenkasten angenommen.
 - Im **Regionalverkehr** wird die Temperaturen von 22 °C auf 19 °C gesenkt, dies betrifft rund 5'500 Wagenkästen (2'000 von der SBB). Als Einsparung wird hier der Wert vom DTZ mit 4 MWh/Jahr⁴ angenommen.
 - Als Basis für den **Ortsverkehr** dienen die Resultate der vbz [16] . Für die Abschätzung wird angenommen, dass die Temperatur um 2 K gesenkt wird. Die Einsparung für ein Tram von 36 m beträgt 11 MWh/Jahr, auf eine Skalierung wurde verzichtet. Für Trolleybusse wurde angenommen, dass die Einsparungen mit 5.5 MWh/Jahr halb so gross wie beim Tram sind, da Trolleybusse in der Regel deutlich kürzer als Trams sind.
- Als **Gesamtpotenzial** resultiert eine Einsparung von 38 GWh/Jahr. Die Autoren schätzen, dass innerhalb der nächsten 10 Jahre bis 2035 ein Potenzial von rund 60% realisiert werden kann. Wichtig ist die Berücksichtigung von Neubeschaffung von Fahrzeugen und das Ausnutzen von Synergien bei sowieso geplanten Updates der Fahrzeugsoftware.
- Das Gesamtpotenzial wurde mit vielen vereinfachenden Annahmen ermittelt und soll die Grössenordnung der möglichen Einsparungen zeigen. Die Genauigkeit der Werte wird auf maximal ± 50 % geschätzt. In einem nächsten Schritt wird empfohlen, eine Abschätzung aufgrund der Flottenentwicklungen und deren Einsatzdauer zu ermitteln.

Tabelle 5: Schätzung des Gesamtpotenzials der Energieeinsparung für die Absenkung der Fahrgastraumtemperaturen mit einer Genauigkeit von ± 50%.

| | | Fernverkehr | Regionalverkehr | Tram | Trolleybusse | Summe |
|---|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| Energiebedarf 2020 | GWh/Jahr | 660 | 1'305 | 155 | 65 | 2'185 |
| Anzahl Fahrzeuge (Wagenkasten / Fahrzeug) | Stück | 1'992 | 5'505 | 731 | 536 | 8'764 |
| Absenkung der Raumlufttemperatur | K | 1 | 2 - 3 | 2 - 3 | 2 - 3 | |
| Abschätzung: Energieeinsparung pro Wagenkasten / Fahrzeug | MWh/Jahr | 2.5 (pro Wagenkasten) | 4.0 (pro Wagenkasten) | 11.4 (pro Tram à 36m) | 5.7 (pro Trolleybus) | |
| Gesamtpotenzial Energieeinsparung | GWh/Jahr | 5 | 22 | 8 | 3 | 38 |
| Potenzial bis 2035 Annahme: 60% realisierbar | GWh/Jahr | 3 | 13 | 5 | 2 | 23 |
| Finanzielle Einsparung | MCHF/Jahr | 0.4 | 1.6 | 0.6 | 0.2 | 2.8 |

Einsparpotenzial von rund 12 GWh bei SBB-Fahrzeugen

Im Rahmen dieses Projektes wurde für die gesamte Flotte der SBB-Fahrzeuge das Potenzial bestimmt: Mit den oben skizzierten Sollwerten ergibt sich ein Energiesparpotenzial für die SBB-Fahrzeuge von rund 12 GWh pro Jahr, wobei ein Drittel aus dem Fernverkehr und zwei Drittel aus dem Regionalverkehr stammen. Dies entspricht etwa 1 % des Energiebedarfs der Traktionsenergie der Züge.



Abbildung 24: Regio-Dosto Triebzug der SBB

⁴ Aus Sicht der Autoren entsteht durch diese Wahl kein systematischer Fehler: Zwar ist der DTZ ein Doppelstockfahrzeug, d.h. die Wirkung wird eher etwas überschätzt. Auf der anderen Seite wurde beim DTZ eine Reduktion von bloss 2 K umgesetzt, vorgeschlagen wird jedoch eine Absenkung um insgesamt 3 K.

7 Diskussion

Gemäss Fanger [7] sind bei der Bewertung des PPD mindestens 5 % mit dem Umgebungsklima unzufrieden, da jede Person die Einflussfaktoren unterschiedlich gewichtet und empfindet. In der vorliegenden Studie waren je nach Fahrzeug und Temperatur zwischen rund 80 und 90 % der Fahrgäste mit der eingestellten Temperatur zufrieden. Diese Angaben sind jedoch nicht direkt mit der Bewertung PPD von Fanger [7] vergleichbar. Insbesondere sind keine weiteren Informationen zu den Einflussfaktoren wie Strahlungstemperaturen, Luftgeschwindigkeiten und Luftfeuchtigkeit vorhanden.

Das ursprüngliche Ziel der TU, die Temperatur in den Zügen während der drohenden Energiemangellage zu senken, konnte mit den gewählten Methoden nur teilweise realisiert werden. Insbesondere der Effekt einer manuellen Absenkung der Temperatur war in den Temperaturmesswerten nicht durchgehend nachzuvollziehen.

Es muss berücksichtigt werden, dass die Fahrgäste nach ihrer bisherigen Aufenthaltsdauer im Zug befragt wurden. Je kürzer die Aufenthaltsdauer bis zum Zeitpunkt der Befragung ist, desto stärker wird die Wahrnehmung der Temperatur durch weitere Faktoren wie Aufenthalt am Perron bei Aussenlufttemperatur oder vorherige körperlicher Aktivität beeinflusst sein. Vergleiche hierzu auch Kapitel 3.1.

Insgesamt unterscheiden sich die Temperaturbereiche 20 °C bis 22 °C in der Wahrnehmung der Fahrgäste im Fernverkehr kaum. Bei 21 °C Raumtemperatur sind die Zufriedenheitswerte am höchsten und der Anteil unzufriedener Fahrgäste ist ausgeglichen zwischen «zu warm» und «zu kalt».

In die Kategorie Regionalverkehr fallen in dieser Untersuchung Fahrzeuge mit recht unterschiedlichem Einsatzprofil. So ist die mittlere Reisedauer in der S-Bahn Bern (RBS-Fahrzeuge) nur etwa 10 Minuten, während sie auf den Regio-Dosto oder FLIRT Triebzügen der SBB am Genfersee durchaus 30 Minuten betragen kann. Entsprechend sind mögliche Sollwertanpassungen auf das Einsatzprofil der jeweiligen Fahrzeugflotte abzustimmen.

Bei einer Aufenthaltsdauer bis 10 Minuten ist die Zufriedenheit im Regionalverkehr auch bei 16 bis 17 °C Raumlufttemperatur hoch. Aufgrund der vergleichbar kurzen Aufenthaltsdauer gilt diese Beobachtung auch für den Ortsverkehr.

Die tatsächliche Regeltoleranz der HLK-Anlagen in Zügen beträgt üblicherweise zwischen ± 1 K und ± 2 K auf den eingestellten Sollwert. Insbesondere um eine zu hohe Raumlufttemperatur zu vermeiden, sollte dies bei der Wahl der Sollwerte berücksichtigt werden. So zeigen die Untersuchungen doch einen klaren Anstieg der Rückmeldungen «zu warm» ab 23 °C im Fernverkehr und ab 21 °C im Regionalverkehr gegenüber tieferen Temperaturniveaus.

8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mit diesem Projekt konnte aufgezeigt werden, dass im öffentlichen Verkehr die Fahrgast-Raumlufttemperatur gesenkt werden kann, ohne dass die Behaglichkeit der Fahrgäste abnimmt. Andererseits kann mit einer Temperaturabsenkung eine beträchtliche Menge Energie eingespart werden.

Daraus ergeben sich die folgenden Empfehlungen, sowohl für die Transportunternehmen als Betreiber der Fahrzeuge wie auch für die Wissenschaft für weitere Untersuchungen.

8.1 Empfehlungen für Transportunternehmen

Die Transportunternehmen sollen prüfen, inwiefern sie die Temperaturen im Fahrgastraum senken können, oder ob bereits realisierte Temperatursenkungen beibehalten werden können.

- **Insgesamt ist die Zufriedenheit der Fahrgäste hoch:** Im Fernverkehr ist die Zufriedenheit gleichbleibend hoch (85 % und mehr) bei Temperaturen zwischen 20 °C und 22 °C, im Regionalverkehr erreicht die Zufriedenheit bei Temperaturen zwischen 18 °C und 20 °C beste Werte (86 % und mehr). Bei einer Aufenthaltsdauer bis 10 Minuten ist die Zufriedenheit im Regionalverkehr auch bei 16 bis 17 °C Raumlufttemperatur hoch (87 % und mehr). Aufgrund der kurzen Aufenthaltsdauer gilt diese Beobachtung auch für den Ortsverkehr.
- **Achtung vor zu hohen Temperaturen im Fahrgastraum:** Der Anteil Fahrgäste mit Rückmeldungen «zu warm» liegt im Regionalverkehr deutlich über dem Anteil Rückmeldungen «zu kalt». So zeigen die Untersuchungen einen klaren Anstieg der Rückmeldungen «zu warm» bei 23 °C im Fernverkehr und ab 21 °C im Regionalverkehr gegenüber tieferen Temperaturniveaus. Weiter muss bei der Wahl der Temperatursollwerte die Regeltoleranz der HLK-Anlagen berücksichtigt werden, diese beträgt üblicherweise ± 1 bis ± 2 K auf den eingestellten Sollwert.
- **Die Aufenthaltsdauer hat einen grossen Einfluss:** Je länger die Fahrgäste im Zug sitzen, desto wichtiger ist eine Raumlufttemperatur von 20°C und höher. Je nach Aufenthaltsdauer der Fahrgäste im Zug kann es deshalb sinnvoll sein, die Temperatursollwerte entsprechend dem Einsatzgebiet zu optimieren.

Vermeintlicher Widerspruch zwischen Fahrgastumfragen und Kundendienstmeldungen

Die hohe Anzahl an Rückmeldungen «zu warm» bei diesem Projekt liegt im (vermeintlichen) Widerspruch zu den Rückmeldungen des Kundendienstes SBB, die im Winter vornehmlich Fahrgaststimmen «zu kalt» erhalten. Die Autoren gehen davon aus, dass Reklamationen vor allem dann erfolgen, wenn sich Personen nicht mehr «einrichten» können (wenn es zu kalt ist und sie keine zusätzliche Kleidung bei sich haben). Fahrgästen, welche die Temperatur als «zu warm» empfinden, können ihr individuelles Empfinden verbessern, indem Jacke oder Pullover ausgezogen werden. Hinzu kommen weitere Einflüsse auf den thermischen Komfort wie Luftbewegung, Oberflächentemperatur, etc. die nicht durch die Fahrgäste beeinflusst werden können.

Weiter ist zu beachten, dass sich bei den Transportunternehmen einzelne Fahrgäste melden, die grosse Mehrheit der Fahrgäste meldet sich nicht. Anhand der Erfahrung der Kundendienste und Technikexperten muss abgeschätzt werden, ob tatsächlich systematische Probleme auf einzelnen Flotten bestehen. Aus diesem Grund empfehlen die Autoren, die Wahl der Sollwerttemperatur nicht zu stark auf einzelne Rückmeldungen abzustimmen, sondern vielmehr eigene Fahrgastumfragen durchzuführen, bei der eine repräsentative Anzahl Fahrgäste befragt werden.

Wie soll nun ein Transportunternehmen bei der Absenkung der Raumlufttemperatur vorgehen? Im Folgenden werden einige Praxiserfahrungen zusammengefasst:

Anpassung der Sollwerte der Raumtemperatur über Anpassung der Fahrzeugsoftware. Eine wirkungsvolle Umsetzung der Temperaturabsenkung muss durch eine Anpassung der Fahrzeugsoftware erfolgen. Der Effekt einer manuellen Absenkung der Temperatur war in den Messwerten nicht durchgehend nachvollziehbar, siehe auch Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2. Zusätzlich sollte geprüft werden, ob eine separate Sollwertkennlinie für den Fall einer Energiemangellage sinnvoll ist, welche sich von der regulären Sollwertkennlinie unterscheidet.

Empfehlungen für Sollwerte der Raumtemperatur. Auf Basis der Umfrageergebnisse werden folgende Sollwerte der Raumtemperatur nach Verkehrsfunktion empfohlen.

- Für den **Fernverkehr** wird höchstens 21 °C als Sollwert der Raumtemperatur im Heizbetrieb empfohlen. Dies stellt eine Reduktion von 1 K gegenüber dem bisher üblichen Sollwert von 22 °C dar.
- Für den **Regionalverkehr** wird bis zu einer mittleren Reisedauer von 20 Minuten 19 °C als Sollwert der Raumtemperatur empfohlen. Dies ist eine Reduktion von 3 K gegenüber dem bisher üblichen Sollwert von 22 °C.
- Für den **Ortsverkehr** können aufgrund der geringen Anzahl Antworten keine direkten Empfehlungen abgeleitet werden. Es wird daher auf die Antworten aus dem Regionalverkehr mit Aufenthaltsdauer der Fahrgäste bis 10 Minuten verwiesen. Damit wird unter Berücksichtigung der Energieeffizienz 16 °C als Sollwert der Raumtemperatur für den Ortsverkehr empfohlen.

Berücksichtigung von Fahrzeugeigenschaften und Aufenthaltsdauer der Fahrgäste: Bei der Wahl der Temperatursollwerte sind unbedingt die individuellen Fahrzeugeigenschaften zu berücksichtigen. Beispielsweise beeinflussen Luftbewegung und Oberflächentemperatur die thermische Behaglichkeit ebenfalls in hohem Masse – bei gewissen Fahrzeugen ist deshalb eine Temperaturabsenkung nicht sinnvoll.

Überprüfung der Temperaturen mit Fahrgastumfragen: Es wird empfohlen, die angepassten Temperaturen mittels Fahrgastumfragen zu überprüfen, dabei hat sich das in diesem Projekt gewählte Vorgehen mit 1 oder 2 Kernfragen bewährt: Mit einer Befragung an zwei Tagen können mit vertretbarem Aufwand rund 3000 Antworten gesammelt werden, so dass verlässliche Daten über die Wahrnehmung der Fahrgäste vorliegen.

Konformität mit Behaglichkeitsparametern gemäss Normen EN 13129 [19] und EN 14750-1 [20]. Die Normen schreiben eine Bandbreite für Regelkurven der Raumlufttemperatur für Fern-, Regional- sowie innerstädtischen Nahverkehr vor. Unsere Empfehlungen der energieeffizienten Sollwerte liegen für den Fern- und Regionalverkehr an der unteren Grenze der in den Normen beschriebenen Bereiche und können so im Ermessen der Transportunternehmen umgesetzt werden. Unsere Empfehlungen für den innerstädtischen Nahverkehr (Ortsverkehr) liegen um 2 K unter der Untergrenze der empfohlenen Sollwert-Regelkurve in [20]. Die Abweichung von der Norm lässt sich mit den Untersuchungen der Fahrgastzufriedenheit dieses Berichts sowie den Erfahrungen der Umsetzung auf dem Cobra-Tram der vbz (Kapitel 6.2) begründen.

Die VöV-Arbeitsgruppe «Nachhaltige Energie» wird das weitere Vorgehen innerhalb der Branche koordinieren und auf Basis der Ergebnisse möglichst branchenweite Empfehlungen für Sollwerte der Raumlufttemperatur je Verkehrsfunktion erarbeiten.

8.2 Ausblick für weitere wissenschaftliche Untersuchungen

Die Regelung des Fahrgaskomforts ist eine herausfordernde Aufgabe. Nach Möglichkeit müssen die unterschiedlichen Bedürfnisse aller Fahrgäste und deren individuelle Disposition berücksichtigt werden. Ebenso sind die Fahrzeuge schnell schwankenden Witterungseinflüssen ausgesetzt, deren Verlauf nicht genügend rasch vorausgesehen werden kann.

Weitere Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit wie Aussenlufttemperatur, Witterung oder Position im Wagen sollen in zukünftigen Arbeiten auf Basis der hier erhobenen Daten ausgearbeitet werden.

Weitere Untersuchungen an einem Zug im Rahmen eines Messprojekts der HSLU für die Zentralbahn werden zeigen, inwieweit Raumlufttemperaturen an verschiedenen Orten im Fahrgastraum voneinander abweichen und dadurch das Komfortempfinden weiter beeinflussen.

Weitere systematische Messungen der Energienutzung in den Fahrzeugen müssen aufzeigen, wie gross die Energie-Einsparung in Realität ausfällt, wenn die Temperaturen im Fahrgastraum im Winter abgesenkt werden.

9 Anhang

9.1 Glossar / Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------------|--|
| BAV | Bundesamt für Verkehr |
| BVB | Basler Verkehrsbetriebe |
| Doppelblindbefragungen | Weder die Befragten noch die Befragenden wissen, welche Solltemperatur eingestellt ist. |
| DTZ | Doppelstock-Triebzug, Name der Fahrzeuge der 2. Generation S-Bahn Zürich |
| HLK | Heizung, Lüftung, Klima |
| MCHF | 1'000'000 CHF |
| PMV | predicted mean vote |
| PPD | predicted percentage of dissatisfied |
| RBS | Regionalverkehr Bern-Solothurn |
| SOB | Südostbahn |
| tl | Transports lausannois |
| TU | Transportunternehmung |
| vbz | Verkehrsbetrieb der Stadt Zürich |
| Vertrauensintervall | Intervall, das den Bereich angibt, in welchem die Werte aller Fahrgäste – nicht nur der befragten – mit einer 95%igen Wahrscheinlichkeit liegen. |
| zb | Zentralbahn |

9.2 Literaturverzeichnis

- [1] N. Vetterli, R. Külpmann und J. Schwarz, „Studie zur Temperatursenkung im S-Bahnverkehr der SBB,“ HSLU, (nicht öffentlich), 2018.
- [2] G. Klein, F. Inderbitzin und M. Gödicke, „Energieeinsparung im Trambetrieb bei verschiedenen Innenraum Temperatursollwerteinstellungen - Quantifizierung und Flottenerfahrungen,“ Bundesamt für Verkehr BAV, Bern, 2023.
- [3] VöV-UTP, „Stromsparempfehlungen für die öV-Branche,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.voev.ch/de/Medien/Mediendetails?newsid=305>.
- [4] K. Schild und W. M. Willems, „Wärmeschutz - Grundlagen - Berechnung - Bewertung,“ 2011.
- [5] G. Haller, „Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen,“ rta Rail Tec Arsenal, Wien, 2006.
- [6] EN ISO 7730, „Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit,“ 2005.
- [7] P. O. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, 1982.
- [8] S. Büttner, F. Sidler und U.-P. Menti, „Thermische Behaglichkeit und Normen im öffentlichen Verkehr,“ 2023.
- [9] S. Büttner, F. Sidler, U.-P. Menti und M. Niffeler, „Synthesebericht - Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV,“ 2021.
- [10] Bundesamt für Verkehr (BAV), „Glossar,“ BAV, 2023. [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/glossar.html>. [Zugriff am 1 5 2023].

- [11] Formstack, „QuickTapSurvey,“ formstack Inc, [Online]. Available: <https://www.quicktapsurvey.com/>. [Zugriff am 18 7 2023].
- [12] Gemini, „Datenlogger Tiny Talk2,“ Gemini, 2019. [Online]. Available: <https://www.gemini dataloggers.com/de/data-loggers/tinytag-talk-2/tk-4014>. [Zugriff am 15 4 2023].
- [13] SIA 180:2014, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*, 2014.
- [14] F. W. Peren, *Formelsammlung Wirtschaftsstatistik*, Springer Gabler, 2020.
- [15] SBB AG, „Modell Temperaturabsenkung, Excel Berechnungsblatt (nicht öffentlich),“ 2019.
- [16] S. Strebel, „Untersuchung Heizenergiebedarf eines Cobra-Trams im Winterbetrieb,“ Hochschule für Technik Rapperswil, 2017.
- [17] BFS, „Statistik Schienengüterverkehr,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr/schiene.html>. [Zugriff am 15 7 2023].
- [18] BAV, „Energieverbrauch pro Verkehrsmittel im Personenverkehr,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/energie/energiekennzahlen-oev/energiekennzahlen-oev-2020/energieverbrauch-verkehrsmittel-pv.html> . [Zugriff am 31 8 2023].
- [19] DIN EN 13129:2016-12, *Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs - Behaglichkeitsparameter und Typprüfungen*, 2016.
- [20] DIN EN 14750-1:2006-08, *Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs - Teil 1: Behaglichkeitsparameter*, 2006.
- [21] M. Rücker, M. Tuchschnid, C. Schirmer und M. Reinhard, „Studie - Energieeffizienz, Treibhausgasreduktion und erneuerbare Energien,“ BAV, 31 8 2021. [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/aktuell-startseite/berichte/perspektive-bahn-2050/energieeffizienz-treibhausgasreduktion-erneuerbare-energien.pdf>. [Zugriff am 15 7 2023].

9.3 Daten für weitere Forschungen



Die Rohdaten, die den vorliegenden Auswertungen zu Grund liegen, stehen für Forschungsinstitute oder andere interessierte Stellen in anonymisierter Form zur Verfügung. Sie können bei Johannes Estermann (johannes.ester mann@sbb.ch) oder Matthias Tuchschnid (matthias.tuchschnid@sbb.ch) angefragt werden.





9.4 Screenshots des Umfragetools

Das Umfragetool war auf Tabletcomputern (Android) installiert und wurde durch die Befragenden bedient. Das Tool speichert neben den Eingaben durch die Befragenden auch die Geoposition und die Uhrzeit der Eingabe.

Die Befragenden waren aufgefordert, nach jedem Wagen-, Klassen- oder Deckwechsel die Umfrage mit Seite 1 zu beginnen. Die Fragen sind im Umfragetool in der dargestellten Reihenfolge angeordnet, mit den jeweils genannten Verzweigungen, um gleichbleibende Angaben nicht mehrmals erfassen zu müssen.

Die lokalen Wetterinformationen wurden durch die Befragenden manuell anhand der Infos der Wetterapp (weather.com) in das Umfragetool eingegeben.

| | |
|---|--|
| <p>Seite 1</p> <p>Antwort «Neuer Zug» führt zu Seite 2.</p> <p>Antwort «Neuer Wagen» führt zu Seite 5.</p> <p>Antwort «Neues Deck» führt zu Seite 7.</p> <p>Antwort «Neue Klasse» führt zu Seite 8.</p> |  |
| <p>Seite 2</p> |  |

| | |
|--|--|
| <p>Seite 3</p> |  <p>Wie stark windet es?</p> <p>stark</p> <p>mässig</p> <p>kaum</p> <p>Wählen Sie 1 aus</p> |
| <p>Seite 4</p> |  <p>Wie ist die Aussentemperatur? (In Grad Celsius)</p> <input data-bbox="587 1003 1248 1066" type="text"/> |
| <p>Seite 5</p> |  <p>Gebe die letzten 8 Zahlen der Fahrzeugnummer ein</p> <input data-bbox="751 1449 1070 1505" type="text"/> |
| <p>Seite 6</p> <p>Antwort «Ein Deck» führt zu Seite 8.</p> <p>Antwort «Zwei Decks» führt zu Seite 7.</p> |  <p>Ist der Zug ein- oder doppelstöckig?</p> <p>Ein Deck</p> <p>Zwei Decks</p> <p>Wählen Sie 1 aus</p> |

| | |
|---------|---|
| Seite 7 |  <p style="text-align: right;">   </p> <h3 style="text-align: center;">In welchem Deck befinden wir uns?</h3> <div style="text-align: center;"> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Unterdeck</div> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Zwischendeck</div> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px;">Oberdeck</div> </div> <p style="text-align: center; font-size: small;">Wählen Sie 1 aus</p> |
| Seite 8 |  <p style="text-align: right;">   </p> <h3 style="text-align: center;">In welcher Klasse befinden wir uns?</h3> <div style="text-align: center;"> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">1. Klasse</div> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px;">2. Klasse</div> </div> <p style="text-align: center; font-size: small;">Wählen Sie 1 aus</p> |
| Seite 9 |  <p style="text-align: right;">   </p> <h3 style="text-align: center;">Wie ist der Wagen belegt? (Von Auge abschätzen)</h3> <div style="text-align: center;"> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">100% oder mehr (4 P. im 4er Abteil)</div> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">75% (3 P. im 4er Abteil)</div> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">50% (2 P. im 4er Abteil)</div> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px;">25% oder weniger (1 P. im 4er Abteil)</div> </div> <p style="text-align: center; font-size: small;">Wählen Sie 1 aus</p> |

| | |
|--|--|
| Seite 10 |  <p>Wie empfinden Sie die Temperatur in diesem Wagen? – Comment ressentez-vous la température dans cette voiture? – How do you feel about the temperature in this coach?</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="432 472 746 779" style="background-color: red; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> zu warm trop chaud too warm </div> <div data-bbox="759 472 1070 779" style="background-color: red; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> angenehm agréable pleasant </div> <div data-bbox="1083 472 1398 779" style="background-color: red; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> zu kalt trop froid too cold </div> </div> |
| Seite 11 |  <p>Wie lange reisen Sie schon in diesem Zug? – Depuis combien de temps êtes-vous dans ce train? – How long have you been on this train?</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="432 1173 671 1406" style="background-color: red; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> 0-5 min </div> <div data-bbox="683 1173 916 1406" style="background-color: red; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> 6-10 min </div> <div data-bbox="927 1173 1161 1406" style="background-color: red; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> 11-20 min </div> <div data-bbox="1173 1173 1410 1406" style="background-color: red; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> mehr als/ plus de/ more than 20 min </div> </div> |
| <p>Die Seiten 10 und 11 werden nun maximal 25-mal wiederholt. Anschliessend startet die Umfrage wieder mit Seite 1. Auf jeder Seite erlaubt die Taste  die Rückkehr zur Seite 1.</p> | |
